НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА"

Науковий журнал

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА
та
ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

№2’2024

Засновано національним університетом "Запорізька політехніка"
у травні 1999 року

Виходить 4 рази на рік

Запоріжжя

2024

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

«ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА»

Головний редактор д-р техн. наук Яримбаш Д.С.
Заст. гол. редактора д-р техн. наук 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, Кардіффський університет, Кардіфф, Великобританія;
Sebastian Tomy, Ph.D, професор університету Торонто, м. Торонто, Канада, технічний експерт корпорації "Motor Drives and Control Group", Бей-Сіті, Мічиган, США;
Arturi, Cesare Mario, Ph.D., професор політехнічного університету Мілана, Італія;
Ronseero-Clemente Carlos, Ph.D,, професор факультету Електроенергетика та електронні системи, Університет Естремадури, м. Бадахос, Іспанія;
José Roberto Camacho, PhD, професор електротехніки в Uberlandia федеральний університет, Бразилія;
Mohamed Ahmed Moustafa Hassan, Ph.D., професор кафедри електротехніки та електроенергетики, Каїрський університет, Гіза, Єгипет.

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

ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ (Україна)

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

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

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

Електрона адреса журналу http://ee.zntu.edu.ua **E-mail:** etae@ukr.net

Комп'ютерна верстка Дяченко О.О. Редактор англійських текстів Войтенко С.В. Журнал підписано до друку 20.06.2024 за рекомендацією вченої ради національного університету "Запорізька політехніка" (протокол №11 від 24.06.2024 р.). Формат 60x84/8. Ум. Др. Арк. 5,81. Тираж 300 прим. Зам. №725.

© Національний університет "Запорізька політехніка", 2024

ZAPORIZHZHIA POLYTECHNIC NATIONAL UNIVERSITY

Scientific journal

ELECTRICAL ENGINEERING & POWER ENGINEERING

№2’2024

Founded by Zaporizhzhia Polytechnic National University in May 1999

4 issues per year

Zaporizhzhia

2024

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

«ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА»

Editor-in-chief Prof., Sc.D. DmytroYarymbash
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 EDITIONAL BOARD

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

MEMBERS OF EDITIONAL BOARD (Ukraine)

M.V. Zagirnyak, Sc.D., prof., Kremenchuk Michaylo Ostrogradskiy National University; **S. E Zirka**, Sc.D., prof., Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine; **V. I. Milykh**, Sc.D., prof., National Technical University "KhPI", Khrarkiv, Ukraine; **A. V. Zhyltsov**, Sc.D., prof., National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine; **Ya. S. Paranchuk**, Sc.D., prof., Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine; **O. I. Tolochko**, Sc.D. prof., Kyiv Polytechnic National Technical University, Kiev, Ukraine; **V. V. Busher**, Sc.D., prof., Odesa National Polytechnic University, Odesa, Ukraine; **P. D. Andrienko**, Sc.D., prof., Zaporizhzhia 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, Khmelnitsky, Ukraine; **V. V. Kochan**, Ph.D., assoc. prof., Ternopil National Economic University, Ternopil, Ukraine; **L. S. Globa**, Sc.D. prof., Kyiv Polytechnic National Technical University, Kyiv, Ukraine; **M. A. Skulish**, Ph.D., assoc. prof., Kyiv Polytechnic National Technical University, Kyiv, Ukraine; **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 Recource Index; Scientific Indexing Services (SIS); Ulrich's Periodicals Directory; WorldCat; CyberLeninka; Scientific Periodicals of Ukraine — the project of the National Library of Ukraine named V.I. Vernadsky (NBUV).*

The scientific journal publishes the results of fundamental and applied research, in particular the results of dissertation papers for obtaining the scientific degrees of a Sci.D. and a Ph.D. of technical sciences in the field of electrical engineering and electrical engineering in accordance with the headings: 1. Electrical engineering; 2. Power engineering; 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 registrated: 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 June 20, 2024 on the recommendation of the academic council of the Zaporizhzhia Polytechnic National University (Protocol No.11 dated June 24, 2024). Sheet size 60x84/8. Cond. Print. Sheets 5,81. Number of copies printed 300. Rep. № 725.

© Zaporizhzhia Polytechnic National University, 2024

ЗМІСТ

І ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

Ноздренков В.С., Дяговченко І. М., Петровський М. В., Волохін В. В.
Нечітка модель компенсації факторів старіння розподільних трансформаторів…….7

ІІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

Данильченко Д.О., Кузнецов Д.С.
Підвищення ефективності впровадження та взаємодії розподіленої генерації з локальною електричною мережею…….18

Степаненко Ю.В.
Дослідження напруги несиметрії у трифазних мережах з різними режимами нейтралі……...27

ІІІ АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Олішевський І.Г.
Обгрунтування енергоефективності автоматизованої технології опалення на ГЕС…….36

Назарова О.С., Кулинич Е.М., Бережний О.Ю.
Мехатронна система для вивчення процесів керування на прикладі моделі літального апарату типу «ПЛАНЕР»……...44

CONTENTS

I ELECTRICAL ENGINEERING

Nozdrenkov V.S., Diahovchenko I.M., Petrovskyi M.V., Volokhin V.V.
Fuzzy model of compensation for aging factors of distribution transformers……7

II POWER ENGINEERING

Danylchenko D.O., Kuznetsov D.S.
Increase the efficiency of implementation and interaction of distributed generation with the local electric network…….…….18

Stepanenko Y.V.
Study of unbalance voltage in three-phase networks with different neutral modes……..…….27

III AUTOMATION AND COMPUTER INTEGRATED TECHNOLOGIES

Olishevskyi I.H.
Substantiation of energy efficiency of automated heating technology at HPS ..…….…….36

Nazarova O.S., Kulynych E.M., Berezhnyi O.U.
A mechatronic system for studying control processes on the example of a "GLIDE" type aircraft model……..……44

УДК 621.314:621.316.17

НЕЧІТКА МОДЕЛЬ КОМПЕНСАЦІЇ ФАКТОРІВ СТАРІННЯ РОЗПОДІЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

НОЗДРЕНКОВ В.С. канд. техн. наук, доцент, інженер-програміст Codeminders/Tristero Consulting, Київ, Україна, e-mail: valerii.nozdrenkov@gmail.com, ORCID: 0009-0002-0579-682;

ДЯГОВЧЕНКО І. М. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електроенергетики Сумського державного університету, Суми, Україна, e-mail: i.diahovchenko@etech.sumdu.edu.ua, ORCID: 0000-0001-8575-8280;

ПЕТРОВСЬКИЙ М. В. канд. фіз. мат. наук, доцент, доцент кафедри електроенергетики Сумського державного університету, Суми, Україна, e-mail: m.petrovskyi@etech.sumdu.edu.ua, ORCID: 0000-0002-0387-3136;

ВОЛОХІН В. В. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерної інженерії Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій, Київ, Україна, e-mail: v.volokhin@etech.sumdu.edu.ua, ORCID: 0009-0001-8000-3193;

Мета роботи. *Метою даної роботи є проведення оцінки негативних факторів, що впливають на старіння силових розподільних трансформаторів, розробка нечіткої моделі управління засобами їх компенсації та дослідження результатів застосування запропонованої моделі для різних режимів роботи електричної мережі.*

Методи дослідження. *Для реалізації системи управління режимами роботи електричної мережі був використаний математичний метод нечіткої логіки.*

Отримані результати. *В роботі представлено структуру на основі нечіткої логіки для компенсації факторів старіння розподільних трансформаторів. Було розроблено алгоритм налаштування та розроблено заходи, спрямовані на оптимізацію рівня навантаження та коефіцієнта потужності трансформатора. Розроблена модель аналізує параметри та фактори, що впливають на нормальну роботу трансформатора, і попереджає про наявність небезпечних факторів, які становлять загрозу надійності та можуть призвести до несправності. Крім того, було проаналізовано та обговорено ефективність фотоелектричних генеруючих станцій, батарей шунтових конденсаторів і систем накопичення енергії, встановлених на стороні вторинної напруги, для збереження терміну служби розподільних трансформаторів..*

Наукова новизна. *В роботі отримали подальший розвиток моделі нечіткої логіки, що використовуються для оптимізації роботи електричної мережі та компенсації факторів старіння силових розподільних трансформаторів.*

Практична цінність. *Отримані в роботі результати можуть бути використані для побудови оптимальної системи управління режимами роботи електричної мережі, яка зменшує фактори, що прискорюють старіння силових розподільних трансформаторів.*

Ключові слова: електромобілі; старіння трансформаторів; накопичення енергії; фотоелектричні системи; розподіл електроенергії; компенсація реактивної потужності.

I. ВСТУП

Обмеженість ресурсів і екологічні проблеми останніх десятиліть активно штовхають людство до відмови від використання нафти і переходу на альтернативні джерела енергії. Важливим кроком на цьому шляху має стати поступовий перехід від автомобілів з двигуном внутрішнього згоряння до електромобілів (ЕМ).

Однак перехід до транспортних засобів з електричним приводом приносить не тільки переваги, але й виклики, які необхідно вирішити. По-перше, глобальне споживання електроенергії в принципі зросте, тому що масова зарядка електромобілів буде додана до побутової техніки, міських і промислових об’єктів. По-друге, до щоденних піків споживання додається новий – вечірній, коли електромобілі заряджатимуться вдома та на парковках. По-третє, зросте навантаження на лінії електропередачі і трансформатори, оскільки зарядка електромобілів споживає значно більше електроенергії, ніж зви-чайна побутова техніка. У таблиці 1 наведено класифікацію зарядних станцій згідно з [1], [2]. Таким чином, лише декілька зарядних станцій дуже швидкої зарядки, що працюють одночасно, можуть призвести до значного перевантаження розподільного трансформатора і активізації факторів, що прискорюють його старіння. Силові трансформатори є одними з ключових елементів розподільних електромереж, і забезпечення їх надійності має першочергове значення. Передача та розподіл електроенергії

© Ноздренков В.С., Дяговченко І. М., Петровський М. В., Волохін В. В., 2024
DOI 10.15588/1607-6761-2024-2-1

неможливі без використання силових трансформаторів, що вимагає правильної експлуатації та моніторингу цих електричних машин.

Таблиця 1. Категорії зарядних станцій

Тип	Потужність	Струм	Час заряджання, год
Повільний заряд	≤ 10 кВт	змінний	3-24
Нормальний заряд	від 10 кВт до 22 кВт	змінний	3-12
Швидкий заряд	від 22 кВт до 55 кВт	змінний або постійний	1-3
Дуже швидкий заряд	> 50 кВт	постійний	< 1

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Прийнято вважати, що зарядка електромобілів часто починається після повернення людей з роботи, що збігається з вечірнім піком навантаження [3]. Цей одночасний попит на освітлення, побутову техніку та зарядку електромобілів може перевантажити систему розподілу електроенергії, яка спочатку передбачалася для нижчого попиту на енергію. Протягом останніх років багато дослідників займалися питанням впливу заряджання електромобілів від електромережі на системи розподілу електроенергії та її елементи. У [3] автори оцінили вплив заряджання електромобілів на електромережу, вдома та на роботі, і повідомили про помітне збільшення навантаження на лінію приблизно на 15%. У роботі [4] показано, що робота станцій швидкої зарядки може призводити до значного підвищення температури трансформатора та скорочення терміну його служби. Вплив гармонійних спотворень струму та напруги на старіння розподільного трансформатора оцінено в [5]. Дослідження [6] показало, що гармоніки напруги можуть спричинити значне підвищення температури верхнього шару масла та втрати в сердечнику масляних трансформаторів, погіршення ізоляції обмотки. У [7] запропоновано методологію для отримання просторових і часових прогнозів попиту на заряджання та оцінки потенціалу зменшення пікових навантажень від електромобілів. У роботі [8] продемонстровано можливість подовження терміну служби трансформатора шляхом оптимального планування зарядки електромобіля. Автори [9] досліджують, чи є підсилення мережі доцільним з точки зору вартості електричної мережі з високим рівнем використання електромобілів, дійшовши висновку, що можна зменшити витрати на зарядку ЕМ за потужності трансформатора струму.

Оцінка прискорення старіння розподільних трансформаторів в результаті додаткових зарядних навантажень, доданих гібридними електромобілями, що підключаються до електромережі, наведена в [10]. В [11], [12] представлені ймовірнісні методи, керовані даними, для оцінки перевантаження та старіння трансформатора, коли це пов'язано з високим рівнем попиту на зарядку електромобілів у поєднанні з генерацією від фотоелектричної системи на даху. У [13] оцінено теплове старіння масляних трансформаторів за допомогою штучної нейронної мережі та моделювання за методом Монте-Карло. У статті [14] пропонується використовувати підхід глибокого навчання на основі нейронної мережі для прогнозування тривалості життя трансформатора. Автори [15] і [16] оцінили втрату ресурсу трансформаторів у розподільчих мережах з індивідуальними житловими будинками та великою кількістю підключених електромобілів і дослідили, як можна компенсувати фактори, що викликають старіння трансформатора за допомогою підсилення системи живлення, включаючи локальну фотоелектричну генерацію (ФЕ) та акумуляторної батареї (BESS). Результати [11], [12] показали, що наявність фотоелектричної генерації в електричних мережах із зарядними пристроями для електромобілів може зменшити старіння трансформатора, а з BESS цей позитивний ефект є ще більш значним [15], [16]. У [3], [7] вплив попиту на зарядку електромобілів досліджено лише для напруги на шині та рівнів навантаження на відгалуження. У статтях [4], [7]–[10] досліджується зношення трансформаторів, але не враховуються впливи споживачів із фотоелектричними панелями на даху або варіанти модернізації електричної мережі за допомогою блоків BESS. Ефект розподіленої генерації та технологій зберігання енергії не включено в модель старіння трансформатора в [13]. Методи, засновані на штучному інтелекті [13], [14] вимагають великої кількості даних з відомими умовами для навчання та тестування, але вони все ще суб'єктивні. Крім того, в [14] характеристичні величини, що використовуються в моделі прогнозування, були отримані з припущенням їх розподілу Вейбулла, який може бути дійсним не у всіх випадках. Для кількісного виміру невизначеностей випадкових процесів в роботах [11]–[13] використовується метод Монте-Карло. Однак точність розрахунків методом Монте-Карло сильно залежить від кількості ітерацій. Наприклад, щоб підвищити точність у 10 разів, необхідно збільшити кількість ітерацій у 100 разів. А зі збільшенням кількості ітерацій збільшується і час розрахунку [17]. У [16] моделюється лише один рівень проникнення ЕМ, тоді як розглянута частка реактивної потужності є нереально високою для житлової електромережі.

Це дослідження базується на результатах попередніх досліджень [15], [16]. Порівняно з [15], у моделювання було враховано вплив вищих гармонік і батарей шунтових конденсаторів (БК) на старіння трансформаторів, і було створено більше сценаріїв. Порівняно з [16], були розглянуті різні рівні проникнення EV, що охоплювали діапазон проникнення від

0% до 100%, і потенціал фотоелектричних установок використовувався для контролю коефіцієнта потужності (КП). Було оцінено ефективність кількох стратегій посилення електричної мережі для компенсації старіння трансформатора за різних рівнів проникнення ЕМ. Ці стратегії включають розгортання BESS, розосереджену фотоелектричну генерацію та встановлення батарей конденсаторів для компенсації реактивної потужності. Інструмент на основі нечіткої логіки було налаштовано для запобігання перевантаженню та перегріву масляного трансформатора, підтримуючи при цьому КП на бажаному рівні. Правила настройки налаштування можуть бути скориговані користувачем залежно від номінальної потужності, рівня напруги або конкретних умов експлуатації. Таким чином, запропонований підхід може бути застосовний для різних ділянок розподільчих мереж.

III. МЕТА РОБОТИ

Це дослідження спрямоване на оцінку негативного впливу вищезазначених факторів на старіння трансформатора та розробку нової основи для запобігання виходу з ладу трансформатора та продовження терміну служби. Досягнення технологій зберігання енергії, розподіленої генерації, компенсації реактивної потужності та нечіткої логіки будуть використані для вирішення зазначеної проблеми.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГУ МАТЕРИАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Як правило, електропостачання житлових будинків у Європі здійснюється через системи електропередачі (СЕП), які підключені до розподільних трансформаторів. Тому ця робота зосереджена на впливі домашньої зарядки на розподільні трансформатори, що живлять ці СЕП. Збільшення споживання електроенергії трансформаторами, що живлять житлові будинки, оснащені електромобілями, які потребують потужних зарядних пристроїв (наприклад, 10-22 кВт) і, швидше за все, заряджаються ввечері, може збільшити навантаження на ці трансформатори, отже, прискорюється їх старіння.

Паралельно з цим продовжують зростати гармонійні спотворення в СЕП через поширення нелінійних навантажень і електронних пристроїв. Крім того, фотоелектричні системи з низькою потужністю короткого замикання можуть впливати на профіль напруги та спричиняти гармонійні спотворення напруги та струму [18], [19]. Коли нелінійні навантаження підключені до СЕП, вони, як правило, споживають нелінійні струми і, як наслідок, спотворюють напругу системи [20]. Найбільш суттєвим ефектом гармонійних спотворень всередині СЕП є підвищення температури. Крім того, гармонійні спотворення можуть негативно впливати на мікроконтролери системи, лічильники електроенергії, вимикачі та реле, викликаючи їх нестабільну роботу [21].

Місцеве введення електроенергії від фотоелектричної системи на рівні громади та від споживачів із фотоелектричними панелями на даху може допомогти уникнути перевантаження трансформатора через заряджання електромобілів. Однак, через специфічний профіль генерації (сонячні установки зазвичай роблять свій основний внесок опівдні), вплив на старіння трансформатора буде недостатнім [22].

Для більш ефективної компенсації факторів, що прискорюють старіння трансформатора, генерація ФЕ повинна поєднуватися з системами накопичення енергії з використання акумуляторної батареї [23]. Встановлення BESS є найбільш поширеним для будинків з фотоелектричними системами, що дає домовласникам можливість зберігати доступний надлишок енергії протягом дня та споживати цю енергію під час підвищеного попиту або коли немає генерації з відновлюваних джерел [24]. Також для компенсації реактивної потужності використовують батареї конденсаторів (БК).

У цій роботі були використані дані річних профілів навантаження 11 реальних житлових будинків і малого підприємства (див. рис.1). Агреговані графіки попиту на потужність від побутових і промислових споживачів агреговані на шині 0,4 кВ трансформатора. Коефіцієнт потужності (КП) кумулятивного навантаження змінюється з часом, і його вихідне середнє значення становить близько 0,73. Профіль навантаження має ранковий і вечірній максимуми.

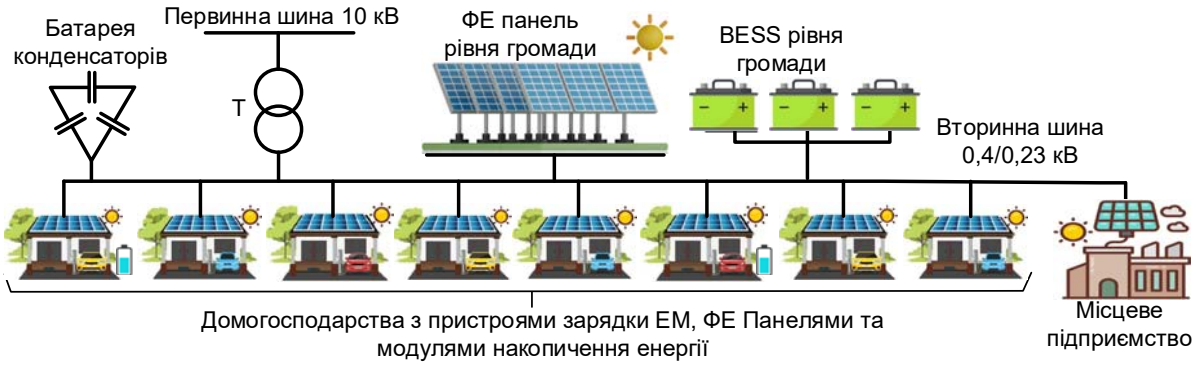


Рисунок 1. Типова схема розподільної мережі

Погодинне навантаження трансформатора на кожному t-му кроці вибірки можна розрахувати як

$$S_{T,t}^{заг} = \sqrt{(P_{спож.t} + P_{EM.t} - P_{ФЕ.t} \pm P_{BESS.t})^2 + (Q_{спож.t} - Q_{БК.t})^2}$$

де $P_{спож.t}$, $Q_{спож.t}$ активна та реактивна потужності споживачів відповідно; $P_{EM.t}$ потреба в потужності ЕМ; $P_{ФЕ.t}$ – вихідна потужність сонячних панелей; $P_{BESS.t}$ потужність BESS; $Q_{БК.t}$ – реактивна потужність БК.

Профілі навантаження та генерація ФЕ для типового літнього робочого дня в розглянутому місці показані на рис. 2. Значення на осі ординат переведено у в.о. і показано у відсотках встановленої потужності трансформатора.

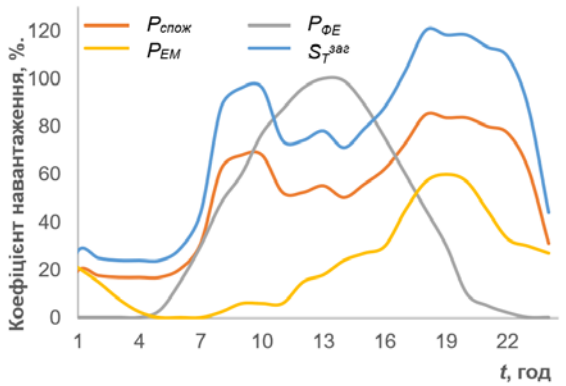


Рисунок 2. Профілі споживання розподільної мережі

Хоча профілі на рис. 2 можуть бути специфічними для Східної Європи, використана методологія є загальною і може бути прийнята в будь-якій країні чи регіоні.

В основі наведеного на рис. 3 алгоритму налаштування знаходиться нечіткий контролер.

У цій роботі розглянуті 4 сценарії роботи електричної мережі.

• Базовий сценарій. Фідер містить лише житлові та виробничі навантаження та електромобілі. Відсоток електромобілів досягає 70%, а в години підбору може досягати 60% від номінального значення трансформатора. Середній КП фідера за рік становить близько 0,73.

• Сценарій 1. На додаток до житлових і виробничих навантажень і електромобілів, у фідері встановлено фотоелектричні блоки. Останні можуть бути фотоелектричними системами на даху, автономними фотоелектричними система-ми або комунальними фотоелектричними системами, встановленими на вторинній стороні трансформатора. Встановлена потужність фотоелектричних установок становить 100% від паспортної потужності трансформатора.

• Сценарій 2. Подібний до попереднього, але з нерегульованою шунтовою батареєю конденсаторів, встановленою на вторинній шині трансформатора. Потужність КБ становить 90% реактивної потужності фідера.

• Сценарій 3. Подібний до попереднього, але з контрольованими BESS. Накопичувач енергії може бути локальним (наприклад, стаціонарний домашній накопичувач енергії) або на рівні громади, встановленим на вторинній стороні трансформатора.

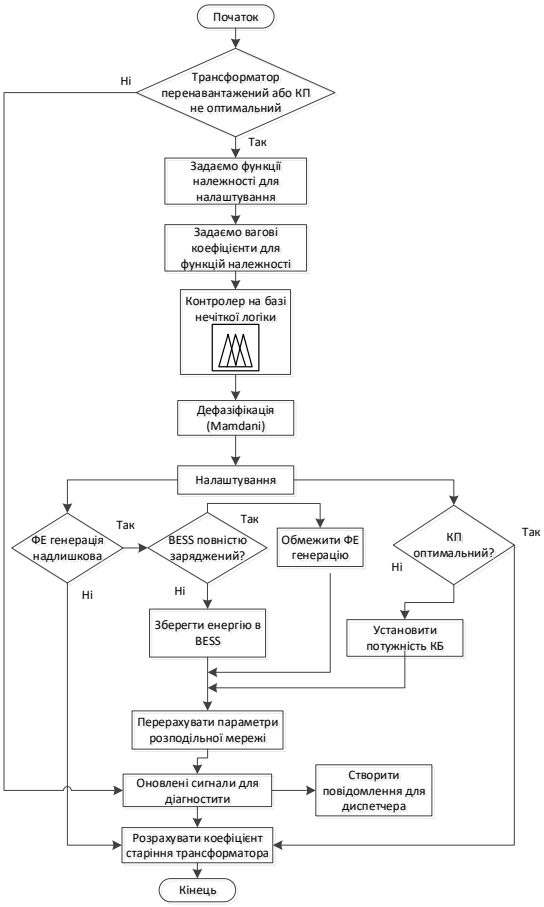


Рисунок 3. Алгоритм запропонованого нечіткого контролеру

Метою налаштування є уникнення сильного перевантаження трансформатора та підтримання КП близько 0,92, коли це можливо. Це можна реалізувати шляхом регулювання вихідної реактивної потужності БК, шляхом керування режимами зарядки та розрядки BESS, а також шляхом тимчасового припинення генерації ФЕ.

Система нечіткої логіки для налаштування показана на рис. 4. Вона має три входи, які є даними про генерацію ФЕ (PV_power), загальну повну потужність (S_power), яка залежить від потреби в енергії, і коефіцієнт потужності (cos_fi) на вторинній шині трансформатора. Кожен вхід має вбудовані функції належності.

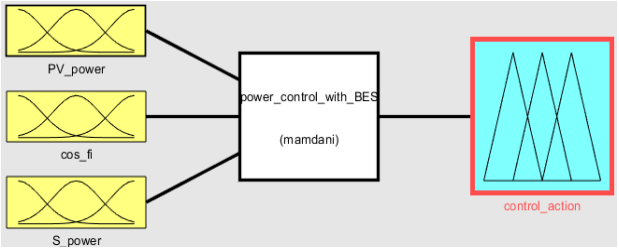


Рисунок 4. Система нечіткої логіки для налаштування

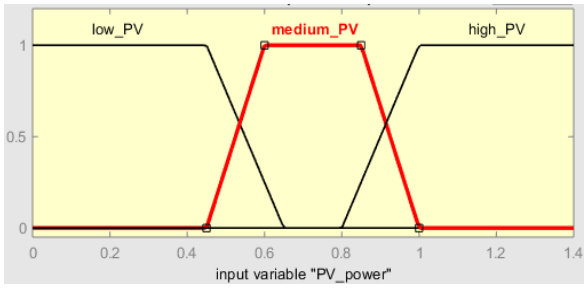
Три функції належності «PV_power» визначають генерацію ФЕ в діапазоні від 0% до 140% від номінальної потужності трансформатора як низьку, середню або високу (рис. 5а). Дві функції належності “cos_fi” визначають перехід між поганим і високим значеннями КП (рис. 5б). Дві функції належності для загального навантаження перетинаються в точці 100% номінальної потужності трансформатора (рис. 5в). Три вихідні функції належності визначають можливі реакції системи. Все від 0 до 0,5 вимагає «тонкого» налаштування, від 0,25 до 0,75 – «активного» налаштування, а від 0,75 до 1 – «інтенсивного» налаштування (рис. 5г). Залежно від вихідного значення, система може регулювати вихідну реактивну потужність КБ від 0% до 100% (один крок становить 8,33%), скорочувати до 15% доступної вихідної потужності ФЕ та перемикатися між режимами зарядки та розрядки BESS.

Правила для нечіткого алгоритму налаштування визначаються користувачем і наведені в табл. 2. Нечіткі правила налаштування

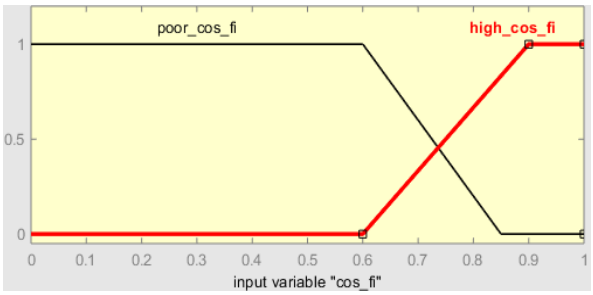
Таблиця 2. Налаштування нечіткого контролеру

IF PV_power	**OR** cos_fi	**AND** S_power	**THEN** Output
low	High	–	subtle
medium	–	–	active
high	poor	–	intense
low	–	high	intense
medium	–	high	intense
–	high	normal	subtle

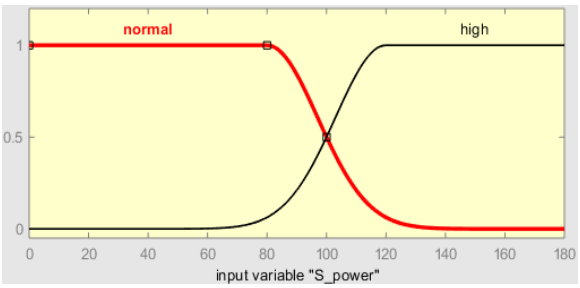
Продемонструємо ефективність налаштування запропонованого методу для компенсації факторів старіння розподільного трансформатора на прикладі того самого робочого дня при 100% використанні ЕМ. Процес налаштування можна вважати успішним, якщо тривалість роботи трансформатора в більш жорстких умовах скорочується на користь менш жорстких умов. Виходи контролерів нечіткої логіки для базового сценарію та сценарію 3 після налаштування наведені на рис. 6. Проаналізувавши рис. 6, можна зробити висновки, що налаштування дозволило скоротити тривалість найбільш різкого режиму роботи (ціле число 3 відповідає режиму «Неминучої проблеми») на користь менш несприятливого режиму «Можлива проблема» (чітке значення 2). Зазначимо, що числу 1 відповідає режим «Увага», а числу 0 режим «Немає проблеми» [25].



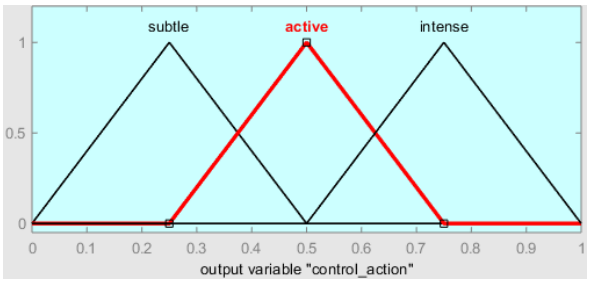
(а)



(б)



(в)



(г)

Рисунок 5. Функції належності: (а) генерація ФЕ; (б) коефіцієнт потужності; (в) загальна потужність; (г) вихід контролера нечіткої логіки

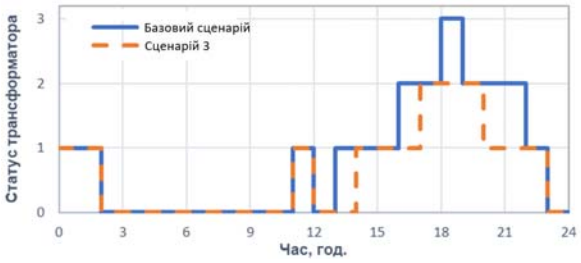


Рисунок 6. Демонстрація результатів роботи

Зміни КП протягом того одного зимового дня для різних сценаріїв зміцнення електричної мережі, за 100% кількістю ЕМ, продемонстровані на рис. 7.

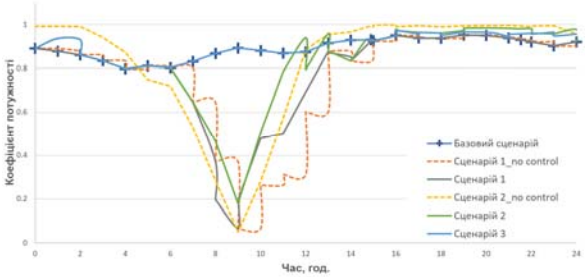


Рисунок 7. Зміна коефіцієнту потужності (КП) при 100% застосуванні ЕМ

Для базового випадку середнє значення КП становить близько 0,9. Що стосується випадку 1, з додаванням неконтрольованої генерації ФЕ, то КП падає, з особливо глибоким падінням між 7:00 і 13:00. Активація контролю ФЕ для регулювання КП може його покращити, але в часовому вікні між 7:00 і 13:00 він все ще значно нижчий за бажане значення 0,92. Дивлячись на випадок 2, з додаванням нерегульованої конденсаторної батареї КП залишається занадто низьким між 6:00 і 12:00, тоді як протягом деяких періодів часу (наприклад, з 15:00 до 2:00) він близький до одиниці. Активація нечіткого налаштування моделі для керування вихідною реактивною потужністю КБ покращує КП лише частково: він все ще далекий від бажаного значення 0,92 протягом більшої частини дня. Найкращих значень КП можна досягти у випадку 3, коли електрична мережа додатково посилена керованим BESS.

V. ВИСНОВКИ

У цьому дослідженні представлено структуру на основі нечіткої логіки для компенсації факторів, які визивають старіння трансформатора, що живить систему розподілу електроенергії з високим рівнем проникнення підключених електромобілів. Було оцінено ефективність наступних методів підсилення мережі для запобігання старіння трансформатора: фотоелектричні генеруючі блоки, батареї шунтуючих конденсаторів і системи накопичення енергії, які встановлені на стороні вторинної напруги.

Запропонований нечіткий алгоритм налаштування системи спрямований на уникнення неприйнятного перевантаження та підтримку коефіцієнта потужності поблизу бажаного рівня. Він може керувати виходом генерації ФЕ, виходом батареї шунтуючих конденсаторів і зарядкою/розрядкою BESS.

З огляду на стратегії посилення мережі, найкращі результати можна спостерігати, коли електрична мережа додатково оснащена контрольованим накопичувачем енергії, фотоелектричними установками та батареєю шунтуючих конденсаторів (тобто, випадок 3 дослідження). У цьому випадку при 100% проникненні ЕМ коефіцієнт старіння трансформатора зменшується більш ніж у 5 разів порівняно з базовим варіантом. За допомогою цієї комбінованої стратегії зміцнення мережі можна усунути вплив зростаючого попиту на зарядку електромобілів на старіння трансформатора.

Незважаючи на покращення режиму роботи трансформатора, КП для випадків 1 і 2 залишається нестабільним і часто падає нижче бажаного значення. Для випадку 3 можна підтримувати КП ближче до бажаного значення протягом дня.

Розроблений алгоритм і засіб на основі фазілогіки є універсальними і можуть бути застосовані на будь-якій ділянці електричної мережі за наявності вихідних даних на цю ділянку. У майбутній роботі слід розглянути «м'які» стратегії для покращення коефіцієнту старіння трансформаторів, які включають планування зарядки ЕМ та еластичність попиту.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

[1] Falchetta G. Electric vehicle charging network in Europe: an accessibility and deployment trends analysis [Electronic resource] / Giacomo Falchetta, Michel Noussan // Transportation research part D: transport and environment. – 2021. – Vol. 94. – P. 102813. – Mode of access: https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102813 (date of access: 15.05.2024). – Title from screen.

[2] Diahovchenko I. Assessment and mitigation of the influence of rising charging demand of electric vehicles on the aging of distribution transformers [Electronic resource] / Illia Diahovchenko, Anastasiia Chuprun, Zsolt Čonka // Electric power systems research. – 2023. – Vol. 221. – P. 109455. – Mode of access: https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109455 (date of access: 12.05.2024). – Title from screen.

[3] Uncontrolled electric vehicle charging impacts on distribution electric power systems with primarily residential, commercial or industrial loads [Electronic resource] / C. Birk Jones [et al.] // Energies. – 2021. – Vol. 14, no. 6. – P. 1688. – Mode of access: https://doi.org/10.3390/en14061688 (date of access: 11.04.2024). – Title from screen.

[4] Argade S. Probabilistic modeling of EV charging and its impact on distribution transformer loss of life [Electronic resource] / Sachin Argade, Visvakumar Aravinthan, Ward Jewell // 2012 IEEE international electric vehicle conference (IEVC), Greenville, SC, USA, 4–8 March 2012. – [S. l.], 2012. – Mode of access: https://doi.org/10.1109/ievc.2012.6183209 (date of access: 12.06.2024). – Title from screen.

[5] Mantilla H. F. M. Aging of distribution transformers due to voltage harmonics [Electronic resource] / Harold Francisco Mazo Mantilla, Andres Pavas, Ivan Camilo Duran // 2017 IEEE workshop on power electronics and power quality applications (PEPQA), Bogota, Colombia, 31 May – 2 June 2017. – [S. l.], 2017. – Mode of access: https://doi.org/10.1109/pepqa.2017.7981649 (date of access: 12.06.2024). – Title from screen.

[6] Dao T. Effects of voltage harmonic on losses and temperature rise in distribution transformers [Electronic resource] / Thinh Dao, Bao Toan Phung // IET generation, transmission & distribution. – 2018. – Vol. 12, no. 2. – P. 347–354. – Mode of access: https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2017.0498 (date of access: 12.06.2024). – Title from screen.

[7] Spatio-temporal modelling of electric vehicle charging demand and impacts on peak household electrical load [Electronic resource] / Phillip Paevere [et al.] // Sustainability science. – 2013. – Vol. 9, no. 1. – P. 61–76. – Mode of access: https://doi.org/10.1007/s11625-013-0235-3 (date of access: 12.06.2024). – Title from screen.

[8] Visakh A. Smart charging of electric vehicles to minimize the cost of chargingand the rate of transformer aging in a residential distribution network [Electronic resource] / Arjun Visakh, M. P. Selvan // Turkish journal of electrical engineering and computer sciences. – 2022. – Vol. 30, no. 3. – P. 927–942. – Mode of access: https://doi.org/10.55730/1300-0632.3819 (date of access: 12.06.2024). – Title from screen.

[9] Should we reinforce the grid? Cost and emission optimization of electric vehicle charging under different transformer limits [Electronic resource] / N. B. G. Brinkel [et al.] // Applied energy. – 2020. – Vol. 276. – P. 115285. – Mode of access: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115285 (date of access: 12.06.2024). – Title from screen.

[10] Nafisi H. Investigation on distribution transformer loss-of-life due to plug-in hybrid electric vehicles charging [Electronic resource] / Hamed Nafisi // International journal of ambient energy. – 2019. – P. 1–7. – Mode of access:

https://doi.org/10.1080/01430750.2018.1563816 (date of access: 12.06.2024). – Title from screen.

[11] Palomino A. Data-Driven risk analysis of joint electric vehicle and solar operation in distribution networks [Electronic resource] / Alejandro Palomino, Masood Parvania // IEEE open access journal of power and energy. – 2020. – Vol. 7. – P. 141–150. – Mode of access: https://doi.org/10.1109/oajpe.2020.2984696 (date of access: 12.06.2024). – Title from screen.

[12] Affonso C. M. Probabilistic assessment of electric vehicle charging demand impact on residential distribution transformer aging [Electronic resource] / Carolina M. Affonso, Mladen Kezunovic // IEEE Xplore. – Mode of access: https://ieeexplore.ieee.org/document/8440211 (date of access: 12.06.2024). – Title from screen.

[13] Romero Quete A. A. Evaluación de la pérdida de vida del aislamiento solido en transformadores de potencia, estimando la historia de carga y los perfiles de temperatura ambiente por medio de redes neuronales artificiales y simulaciones de Monte Carlo [Electronic resource] / Andrés Arturo Romero Quete, Enrique Esteban Mombello, Giuseppe Rattá // Dyna. – 2016. – Vol. 83, no. 197. – P. 104. – Mode of access: https://doi.org/10.15446/dyna.v83n197.48134 (date of access: 12.06.2024)..

[14] A deep learning approach to the transformer life prediction considering diverse aging factors [Electronic resource] / Lanfei He [et al.] // Frontiers in energy research. – 2022. – Vol. 10. – Mode of access: https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.930093 (date of access: 12.06.2024).

[15] El-Bataway S. A. Distribution transformer's loss of life considering residential prosumers owning solar shingles, high-power fast chargers and second-generation battery energy storage [Electronic resource] / Shady A. El-Bataway, Walid G. Morsi // IEEE transactions on industrial informatics. – 2019. – Vol. 15, no. 3. – P. 1287–1297. – Mode of access: https://doi.org/10.1109/tii.2018.2845416 (date of access: 12.06.2024).

[16] Mitigation of transformers' loss of life in power distribution networks with high penetration of electric vehicles [Electronic resource] / Illia Diahovchenko [et al.] // Results in engineering. – 2022. – P. 100592. – Mode of access: https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100592 (date of access: 12.06.2024).– Title from screen.

[17] Schreider Y. A. The Monte Carlo method: the method of statistical trials [Electronic resource] / Yu A. Schreider, G. J. Tee, Alan G. Henney // Physics today. – 1967. – Vol. 20, no. 1. – P. 129. – Mode of access: https://doi.org/10.1063/1.3034116 (date of access: 12.06.2024). – Title from screen.

[18] Shevchenko S. Y. Power quality issues in smart grids with photovoltaic power stations [Electronic resource] / Serhii Yu Shevchenko, Vitalii V. Volokhin, Illia M. Diahovchenko // Energetika. – 2018. – Vol. 63, no. 4. – Mode of access: https://doi.org/10.6001/energetika.v63i4.3623 (date of access: 12.06.2024). – Title from screen.

[19] Power quality experimental analysis of grid-connected photovoltaic systems in urban distribution networks [Electronic resource] / Sebastijan Seme [et al.] // Energy. – 2017. – Vol. 139. – P. 1261–1266. – Mode of access: https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.088 (date of access: 12.06.2024). – Title from screen.

[20] Contemporary electric energy meters testing under simulated nonsinusoidal field conditions [Electronic resource] / Illia Diahovchenko [et al.] // Electrical engineering. – 2021. – Mode of access: https://doi.org/10.1007/s00202-021-01365-8 (date of access: 12.06.2024). – Title from screen.

[21] Volokhin V. V. Prospects of nanomaterials use in current and voltage hall sensors to improve the measurements accuracy and reduce the external impacts [Electronic resource] / Vitalii V. Volokhin, Illia M. Diahovchenko, Bogdan V. Derevyanko // 2017 IEEE 7th international conference "nanomaterials: application & properties" (NAP), Odessa, 10–15 September 2017. – [S. l.], 2017. – Mode of access: https://doi.org/10.1109/nap.2017.8190239 (date of access: 12.06.2024). – Title from screen.

[22] Accounting for the effect of PV panel dustiness on system performance with correction for panel cleaning for matlab simulink [Electronic resource] / Sergiy Shevchenko [et al.] // 2021 IEEE 3rd ukraine conference on electrical and computer engineering (UKRCON), Lviv, Ukraine, 26–28 August 2021. – [S. l.], 2021. – Mode of access: https://doi.org/10.1109/ukrcon53503.2021.9575747 (date of access: 12.06.2024). – Title from screen.

[23] Optimization of storage systems according to the criterion of minimizing the cost of electricity for balancing renewable energy sources [Electronic resource] / Stanislav Fedorchuk [et al.] // 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), Kharkiv, Ukraine, 5–10 October 2020. – [S. l.], 2020. – Mode of access: https://doi.org/10.1109/khpiweek51551.2020.9250155 (date of access: 12.06.2024). – Title from screen.

[24] Evaluation of grid-level adaptability for stationary

battery energy storage system applications in Europe [Electronic resource] / Marcus Müller [et al.] // Journal of energy storage. – 2017. – Vol. 9. – P. 1–11. – Mode of access: https://doi.org/10.1016/j.est.2016.11.005 (date of access: 12.06.2024). – Title from screen.

[25] Beer C. Fuzzy thinking: the new science of fuzzy logic. Bart Kosko [Electronic resource] / Colin Beer // The quarterly review of biology. – 1995. – Vol. 70, no. 2. – P. 210. – Mode of access: https://doi.org/10.1086/418985 (date of access: 12.06.2024). – Title from screen.

Стаття надійшла до редакції 08.05.2024

FUZZY MODEL OF COMPENSATION FOR AGING FACTORS OF DISTRIBUTION TRANSFORMERS

NOZDRENKOV V.S. Ph. D., Associate professor, a software developer in Codeminders/Tristero Consulting, Kyiv, Ukraine e-mail: valerii.nozdrenkov@gmail.com. ORCID: 0009-0002-0579-6821;

DIAHOVCHENKO I.M. Ph. D., Associate professor, Associated Professor of Department of Electrical Engineering of Sumy State University, Sumy, Ukraine, e-mail: i.diahovchenko@etech.sumdu.edu.ua. ORCID: 0000-0001-8575-8280;

PETROVSKYI M.V. Ph. D., Associate professor, Associated Professor of Department of Electrical Engineering of Sumy State University, Sumy, Ukraine, e-mail: m.petrovskyi@etech.sumdu.edu.ua. ORCID: 0000-0002-0387-3136;

VOLOKHIN V.V. Ph. D., Associate professor, Associated Professor Department of Computer Engineering, State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine, e-mail: v.volokhin@etech.sumdu.edu.ua. ORCID: 0009-0001-8000-3193;

Purpose. *This paper aims to evaluate the negative factors that affect the aging of power distribution transformers, develop a fuzzy control model for their compensation, and study the results of applying the proposed model to different modes of the electrical power network.*

Methodology. *The mathematical method of fuzzy logic was used to implement the control system of the power grid operating modes.*

Findings. *The article presents a structure based on fuzzy logic for compensating depreciation factors of distribution transformers. A tuning algorithm and measures were developed to optimize the transformer's load level and power factor. The developed model analyzes the parameters and factors affecting the normal operation of the transformer and warns of dangerous factors that threaten reliability and may lead to a malfunction. In addition, the efficiency of PV generating stations, shunt capacitor banks, and energy storage systems installed on the secondary voltage side to preserve the service life of distribution transformers was analyzed and discussed.*

Originality. *The paper further develops the fuzzy logic models used to optimize the operation of the power grid and compensate for the aging factors of power distribution transformers*

Practical value. *The results obtained in the paper can be used to build an optimal system for controlling the operation modes of the electric power grid, which reduces the factors that accelerate the aging of power distribution transformers.*

Keywords: Electric vehicle; transformer's aging; battery energy storage; photovoltaic systems; power distribution; reactive power compensation.

REFERENCES

[1] Falchetta, G., & Noussan, M. (2021). Electric vehicle charging network in Europe: An accessibility and deployment trends analysis. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 94, 102813. DOI: 10.1016/j.trd.2021.102813

[2] Diahovchenko, I., Chuprun, A., & Čonka, Z. (2023). Assessment and mitigation of the influence of rising charging demand of electric vehicles on the aging of distribution transformers. Electric Power Systems Research, 221, 109455. DOI: 10.1016/j.epsr.2023.109455

[3] Jones, C. B., Lave, M., Vining, W., & Garcia, B. M. (2021). Uncontrolled electric vehicle charging impacts on distribution electric power systems with primarily residential, commercial or industrial loads. *Energies*, 14(6), 1688. DOI: 10.3390/en14061688

[4] Argade, S., Aravinthan, V., & Jewell, W. (2012, March). Probabilistic modeling of EV charging and its impact on distribution transformer loss of life. *In 2012 IEEE International Electric Vehicle Conference* (pp. 1-8). IEEE. DOI: 10.1109/IEVC.2012.6183209

[5] Mantilla, H. F. M., Pavas, A., & Durán, I. C. (2017, May). Aging of distribution transformers due to voltage harmonics. *In 2017 IEEE Workshop on Power Electronics and Power Quality Applications (PEPQA)* (pp. 1-5). IEEE. DOI: 10.1109/PEPQA.2017.7981649

[6] Dao, T., & Phung, B. T. (2018). Effects of voltage harmonic on losses and temperature rise in distribution transformers. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 12(2), 347-354. DOI: 10.1049/iet-gtd.2017.0498

[7] Paevere, P., Higgins, A., Ren, Z., Horn, M., Grozev, G., & McNamara, C. (2014). Spatio-temporal modelling of electric vehicle charging demand and impacts on peak household electrical load. *Sustainability science*, 9, 61-76. DOI: 10.1007/s11625-013-0235-3

[8] Visakh, A., & Selvan, M. P. (2022). Smart charging of electric vehicles to minimize the cost of chargingand the rate of transformer aging in a residential distribution network. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 30(3), 927-942. DOI: 10.55730/1300-0632.3819

[9] Brinkel, N. B. G., Schram, W. L., AlSkaif, T. A., Lampropoulos, I., & Van Sark, W. G. J. H. M. (2020). Should we reinforce the grid? Cost and emission optimization of electric vehicle charging under different transformer limits. *Applied Energy*, 276, 115285. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.115285

[10] Nafisi, H. (2021). Investigation on distribution transformer loss-of-life due to plug-in hybrid electric vehicles charging. *International Journal of Ambient Energy*, 42(7), 744-750. DOI: 10.1080/01430750.2018.1563816

[11] Palomino, A., & Parvania, M. (2020). Data-driven risk analysis of joint electric vehicle and solar operation in distribution networks. *IEEE Open Access Journal of Power and Energy,* 7, 141-150. DOI: 10.1109/OAJPE.2020.2984696

[12] Affonso, C. M., & Kezunovic, M. (2018, June). Probabilistic assessment of electric vehicle charging demand impact on residential distribution transformer aging. *In 2018 IEEE International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS)* (pp. 1-6). IEEE. DOI: 10.1109/PMAPS.2018.8440211

[13] Romero Quete, A. A., Mombello, E. E., & Rattá, G. (2016). Evaluación de la pérdida de vida del aislamiento solido en transformadores de potencia, estimando la historia de carga y los perfiles de temperatura ambiente por medio de redes neuronales artificiales y simulaciones de Monte Carlo. *In DYNA* (Vol. 83, Issue 197, p. 104). Universidad Nacional de Colombia. DOU: 10.15446/dyna.v83n197.48134

[14] He, L., Li, L., Li, M., Li, Z., & Wang, X. (2022). A Deep Learning Approach to the Transformer Life Prediction Considering Diverse Aging Factors. *In Frontiers in Energy Research* (Vol. 10). Frontiers Media SA. DOI: 10.3389/fenrg.2022.930093

[15] El-Bataway, S. A., & Morsi, W. G. (2019). Distribution Transformer's Loss of Life Considering Residential Prosumers Owning Solar Shingles, High-Power Fast Chargers and Second-Generation Battery Energy Storage. *In IEEE Transactions on Industrial Informatics* (Vol. 15, Issue 3, pp. 1287–1297). Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). DOI: 10.1109/tii.2018.2845416

[16] Diahovchenko, I., Petrichenko, R., Petrichenko, L., Mahnitko, A., Korzh, P., Kolcun, M., & Čonka, Z. (2022). Mitigation of transformers' loss of life in power distribution networks with high penetration of electric vehicles. *In Results in Engineering* (Vol. 15, p. 100592). Elsevier BV. DOI: 10.1016/j.rineng.2022.100592

[17] Schreider, Yu. A., Tee, G. J., & Henney, A. G. (1967). The Monte Carlo Method: The Method of Statistical Trials. *In Physics Today* (Vol. 20, Issue 1, pp. 129–129). AIP Publishing. DOI: 10.1063/1.3034116

[18] Shevchenko, S. Yu., Volokhin, V. V., & Diahovchenko, I. M. (2018). Power quality issues in smart grids with photovoltaic power stations. *In Energetika* (Vol. 63, Issue 4). Lithuanian Academy of Sciences. DOI: 10.6001/energetika.v63i4.3623

[19] Seme, S., Lukač, N., Štumberger, B., & Hadžiselimović, M. (2017). Power quality experimental analysis of grid-connected photovoltaic systems in urban distribution networks. *In Energy* (Vol. 139, pp. 1261–1266). Elsevier BV. DOI: 10.1016/j.energy.2017.05.088

[20] Diahovchenko, I., Dolník, B., Kanálik, M., & Kurimský, J. (2021). Contemporary electric energy me-

ters testing under simulated nonsinusoidal field conditions. *In Electrical Engineering* (Vol. 104, Issue 2, pp. 1077–1092). Springer Science and Business Media LLC. DOI: 10.1007/s00202-021-01365-8

[21] Volokhin, V. V., Diahovchenko, I. M., & Derevyanko, B. V. (2017). Prospects of nanomaterials use in current and voltage hall sensors to improve the measurements accuracy and reduce the external impacts. *In 2017 IEEE 7th International Conference Nanomaterials: Application & Properties (NAP). 2017 IEEE 7th International Conference "Nanomaterials: Application & Properties" (NAP). IEEE.* DOI: 10.1109/nap.2017.8190239

[22] Shevchenko, S., Dovgalyuk, O., Danylchenko, D., Rubanenko, O., Fedorchuk, S., & Potryvai, A. (2021). Accounting For The Effect Of PV Panel Dustiness On System Performance With Correction For Panel Cleaning For Matlab Simulink. *In 2021 IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON). 2021 IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. IEEE. DOI: 10.1109/ukrcon53503.2021.9575747

[23] Fedorchuk, S., Ivakhnov, A., Bulhakov, O., & Danylchenko, D. (2020). Optimization of Storage Systems According to the Criterion of Minimizing the Cost of Electricity for Balancing Renewable Energy Sources. *In 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. DOI: 10.1109/khpiweek51551.2020.9250155

[24] Müller, M., Viernstein, L., Truong, C. N., Eiting, A., Hesse, H. C., Witzmann, R., & Jossen, A. (2017). Evaluation of grid-level adaptability for stationary battery energy storage system applications in Europe. *In Journal of Energy Storage* (Vol. 9, pp. 1–11). Elsevier BV. DOI: 10.1016/j.est.2016.11.005

[25] Beer, C. (1995). Fuzzy Thinking: The New Science of Fuzzy Logic.Bart Kosko. *In The Quarterly Review of Biology* (Vol. 70, Issue 2, pp. 210–210). University of Chicago Press. DOI: doi.org/10.1086/418985

УДК 621.316.13

INCREASE THE EFFICIENCY OF IMPLEMENTATION AND INTERACTION OF DISTRIBUTED GENERATION WITH THE LOCAL ELECTRIC NETWORK

DANYLCHENKO D.O. Ph.D., Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electrical Energy Transmission of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: Dmytro.Danylchenko@khpi.edu.ua, ORCID: 0000-0001-7912-1849;

KUZNETSOV D.S. graduate student of the Department of Electrical Energy Transmission of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: dmytro.kuznetsov@ieee.khpi.edu.ua, ORCID: 0009-0003-1543-7854;

Purpose. *There is a trend of transition from a purely centralized power supply to a combined one, the number of local decentralized sources of electricity directly in the distribution networks is increasing. Distribution electric networks are transformed into a network with features characteristic of a local electric system, which receives power both from its own distribution electric networks and from a centralized source. Renewable energy has a number of advantages, but there are also disadvantages. Among them - the complication of the operation of electric networks with the growth of the capacities of renewable sources of electricity installed in them and the instability of generation due to their natural dependence on meteorological conditions, if we talk about technical shortcomings, then this refers to the sinusoidal nature of voltages and currents and voltage deviations, ensuring the quality of electricity which directly depends on ensuring the balance of active and reactive power in the electrical system. The purpose of this article is to analyze the effectiveness of reactive power compensation devices as a tool for reducing the threshold of integration of distributed generation sources into the electrical networks of Ukraine. The task is to study the reduction of the integration threshold for distributed generation.*

Research methods. *Mathematical modeling of an electrical system with distributed generation elements and reactive power compensation devices. The influence of the operation of reactive power compensation devices on the parameters of the electric network is studied. Comparative analysis of network parameters and their change when implementing distributed generation together with and without reactive power compensation devices.*

The results obtained. *The obtained results show that the use of reactive power compensation devices makes it possible to increase the carrying capacity of operating power lines and transformers, which is especially important when most of the power system schemes where distributed generation is integrated are of radial type, i.e. it actually lowers the integration threshold for renewable generation in the electric network. A very important factor is that the introduction of reactive power compensation devices together with distributed generation solves the problem of stabilization and voltage loss in electric networks, and also improves the quality of electric energy.*

Scientific novelty. *The method of selecting reactive power compensators for distribution networks has been further developed, which differs from the existing ones by taking into account the presence of renewable energy sources of various types, which allows to increase the efficiency of the interaction of the local electric network with the renewable generation integrated in it.*

Practical value. *It consists in lowering the integration threshold of distributed generation sources into electric networks by introducing reactive power compensation devices together with them, which affects a number of technological parameters in the node - reduction of power and voltage losses, stabilization and control of voltage, improvement of electric power quality indicators.*

Keywords: sources of distributed generation; renewable energy; reactive power compensation devices; electrical network; losses; implementation.

I. INTRODUCTION

Under modern conditions, in many developed countries, the growth in demand for electricity is met thanks to the integration of renewable energy sources (RES) into the electric networks (EN) [1] – [2].

Over the past 10 years, the greatest growth in Ukraine has been observed in the field of solar and wind energy. Over the next 10 years [3], regardless of the variable nature of production, the total capacity of solar power plants (SPP) and wind power plants will be 25% of the capacity of all sources of electricity in Ukraine [4] – [5]. The term "sources of distributed generation" or "distributed generation" (DG) is used to describe electrical energy sources that are directly connected to the electrical network or connected to it by consumers.

It is necessary to continue improving the methods and means of managing the normal modes of the

© Danylchenko D.O., Kuznetsov D.S., 2024
DOI 10.15588/1607-6761-2024-2-2

electrical networks of Ukraine for the development of renewable sources of electricity. The integration of renewable energy sources into the power system has its advantages, but the connection of such sources to distribution electrical networks has a significant impact on power losses, the voltage level in the electrical network, as well as on the operation of relay protection and automation.

II. ANALYSIS OF RESEARCH AND PUBLICATIONS

The implementation of DG affects distribution EN and turns them into active elements of the power system. This leads to the need to make changes (or review and modernize) in the adoption of EN management, operation and planning strategies. At the same time, their influence can have both a positive and a negative character, therefore it is advisable to carefully analyze the issue of joining EN sources to distribution EN of Ukraine.

It is possible to single out the main directions of influence of DG on EN:

• influence of DG on losses of electrical energy in EM;

• influence of DG on voltage in EN;

• influence of DG on the quality of electric power;

• influence of DG on relay protection and automation;

• the impact of DG on the reliability of work and operation of EN;

The influence of DG on the loss of electrical energy in EN:

Installation of DG power sources in the distribution EN not far from the load can change the direction of power flows. At the same time, three situations should be distinguished regarding the nodal load and DG [6]:

1. The own load of each node in the EN is greater than or equal to the output power of the DG sources connected to this node.

2. There is at least one node in the EN where the output power of the DG sources is greater than the actual load of this node, but the total power of the DG sources of this EN is generally less than the total load.

3. In the EN there is at least one node where the output power of the DG is greater than the own load of this node and the total power of the DG sources of this EN as a whole is greater than the total load.

In the first case, installed DG sources in the EN will affect the reduction of power losses in the distribution EN.

In the second case, DG sources can permanently increase the power losses in some power transmission lines (PTL) of the distribution EM, but, in general, the total power losses in the EN are reduced.

In the third case, the total power losses of the entire distribution EN will be greater than before the installation of DG sources. At the same time, the situation when electric energy is transported in the reverse direction, i.e. from the EN "tail" to its main section, is quite unfortunate. This is due to the fact that the cross-section of power lines in distribution networks, as a rule, decreases from the main section of the power line to its end, and, as is known, the resistance of the power line and its losses depend on the cross-section of the wires. Also, different sources of DG operate with different cosφ and their output reactive power can vary from insignificant generation (gas turbine plants, etc.) to significant, on the scale of distribution EN, consumption (wind power plants, etc.), which also negatively affects the value of power losses in EN [7].

Thus, the installation of DG sources can both increase and decrease power losses in EN, which mainly depends on the location, power, level of introduction of DG sources in EM, their cosφ, as well as on the topology of EN, etc.

The influence of DG on the voltage in EN:

Two types of influence can be distinguished.

First, it is the effect on the voltage level in the steady-state EN operation mode [8]. In traditional distribution networks, that is, in EN radial type, voltage reduction occurs along the direction of electricity supply to consumers, from the main section of the transmission line to its end. After the installation of DG sources in such an EN, the load of the power feeder decreases, and the voltage along the transmission line may increase. In this case, the cosφ of the DG sources and the type of generator (synchronous or asynchronous) are important. In some cases, when using relatively powerful synchronous generators, the allowable voltage level may be exceeded (>1.1U). Thus, the magnitude of the voltage change depends on the installation locations of the DG sources, their power and cocφ (generation or consumption).

Secondly, the influence of DG on voltage fluctuations in EN [8]. In a traditional distribution EN, the active and reactive load of the nodes changes with time, which causes certain fluctuations in the voltage level in the EN. In the direction from the main section to the end of the power line, the voltage fluctuations, as a rule, increase. If the load is concentrated mainly near the end of the transmission line, the voltage level will fluctuate more intensively. After connecting the DG sources to the distribution EN, the latter will affect the fluctuations of the voltage levels in the nodes, increasing or decreasing them. In the case when the DG sources work in coordination with the local load, that is, their power increases (decreases) when the load in the nodes increases (decreases), they will dampen voltage fluctuations. But, when DG sources work inconsistently with the local load, since the power of DG sources depends on primary resources and the initial characteristics of which are difficult to control (such as wind speed, intensity of sunlight radiation, etc.), then in such a situation, DG can significantly increase voltage fluctuations in EN. In

addition, some DG sources (for example, WPP, photovoltaic elements) are characterized by a strong fluctuation of the output power, which significantly affects the fluctuation of voltage levels in the EN nodes, the effect is stronger, the greater the installed power of the DG sources.

The influence of DG on the quality of electrical energy:

The installation of DG sources in distribution EN has a rather significant effect on the quality of electrical energy [9] – [10].

First, DG sources lead to an increase in the flicker dose, which can occur when powerful DG sources are introduced or removed from operation in distribution EN, a sudden change in the output power of RG sources, interaction between DG sources and regulating devices.

Secondly, DG sources can generate high-order harmonics in EN, while DG sources can either themselves be sources of higher-order harmonics or are connected to the distribution EN through an inverter that generates higher-order harmonics in the network, which is typical for fuel and fotogalvanic elements, wind turbines, etc.

Thirdly, DG sources affect voltage dips, which is mostly related to the type of generator. For example, in the case of DG with synchronous generators, after a voltage drop, the latter is restored approximately to the initial level, and in the case of asynchronous generators, the voltage is not restored to the initial level due to a decrease in reactive power support [11]. It should also be noted that the total influence of DG sources on voltage dips depends on the DG power, but not strongly enough.

If we briefly summarize the above effects of DG on the loss of electrical energy, on the voltage and quality of electrical energy, then the use of reactive power compensation devices during the introduction of DG will make it possible to partially or completely solve these problems.

III. PURPOSE OF THE WORK

With the help of mathematical modeling and comparative analysis, the parameters of the local electric network into which distributed generation is integrated with and without reactive energy compensation devices are investigated. The ability of the reactive energy compensation device to increase the efficiency of the interaction of the local electric network with distributed generation and to lower the integration threshold for it is determined.

The main problems of the technical aspects of the implementation of distributed generation and how reactive power compensation devices can affect or eliminate these problems are given.

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

Basically, compensation of reactive electricity is used for:

• reduction of active e/e losses in feeder lines;

• unloading power equipment from reactive power flowing through it;

• reduction of payments for reactive electricity;

• increase in voltage.

To reduce reactive power flows along lines and transformers, sources of reactive power should be located near the places of its consumption. At the same time, the transmission elements of the network are unloaded from reactive power, which reduces losses of active power and voltage.

The use of reactive power compensation devices must be preceded by a thorough technical and economic analysis due to the high cost and sufficient complexity of these devices.

The methods of using compensating devices, depending on their location in the electric power system, are divided into the following types: individual, group, centralized.

With individual compensation, capacitors (capacitor) are connected directly to the place of generation of reactive power, i.e. own capacitor (s) - to an asynchronous motor, individual - to a welding machine, personal capacitor - for an induction furnace, for a transformer, etc. In this way, the power wires suitable for a specific consumer are unloaded from reactive currents. Figure 1 shows the scheme of individual compensation.

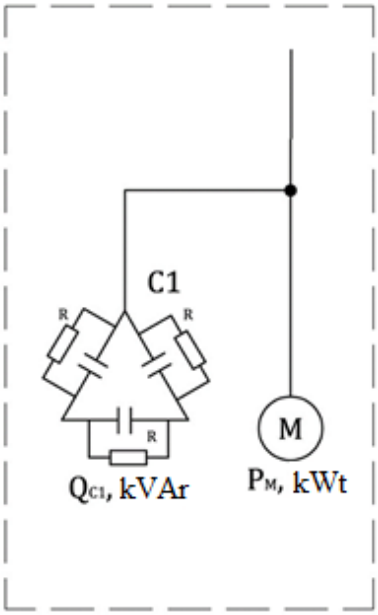


Figure 1. Scheme of individual compensation

Group compensation - refers to the connection of one common capacitor or a common group of capacitors at once to several consumers with significant inductive components.

The line feeding this group of consumers will be unloaded from reactive power. Figure 2 shows the scheme of group compensation.

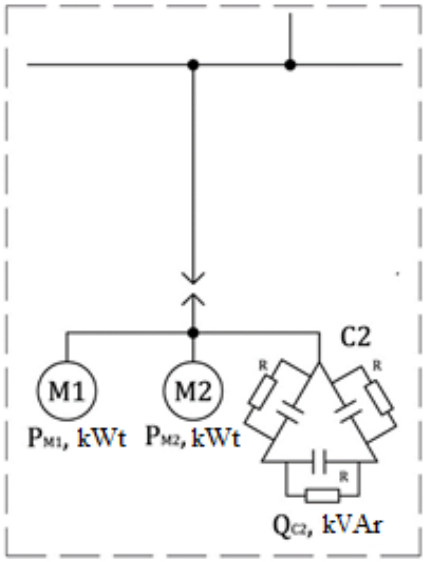


Figure 2. Scheme of group compensation

Centralized compensation involves the installation of capacitors with a regulator in the main or group distribution board. The regulator evaluates the current consumption of reactive power in real time, and quickly connects and disconnects the required number of capacitors. As a result, the total power consumed from the network is always minimized in accordance with the instantaneous value of the required reactive power. Figure 3 shows the scheme of centralized compensation.

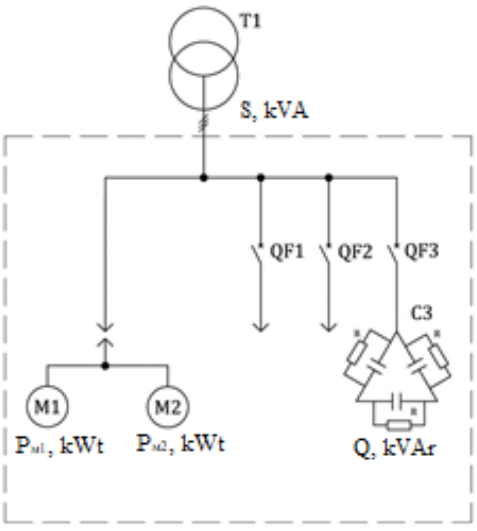


Figure 3. Scheme of centralized compensation

The main modern reactive power compensation devices include capacitor units (0.4-10kV) and STATKOM (6-35kV and above)

Condenser units are of 2 types:

• Regulated (automatic) capacitor units (ACU);

• Non-regulated (non-automatic) condensing units (NCU);

Regulated (automatic) capacitor units (ACU) mean that the reactive power in the network is regulated using a microprocessor regulator, which, thanks to the signal from the current transformer at the input of the enterprise or distribution device, etc., supplies the command to close or open the stages of the capacitor unit that make up the battery.

The power of such an installation is calculated based on the analysis of the electricity consumption data of the enterprise or the power grid and is selected by the appropriate load levels. Generation of settings is disabled due to the settings of the regulator. A one-line diagram of such an installation is shown in Figure 4.

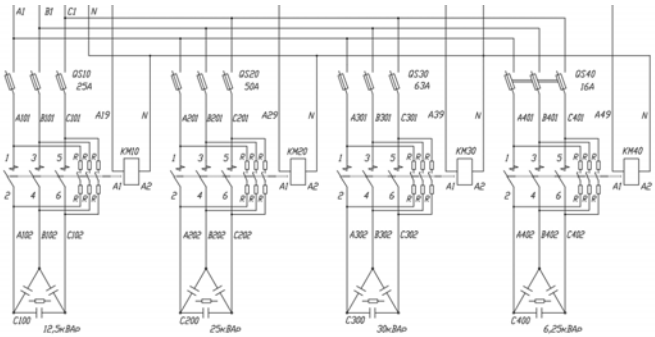


Figure 4. One-line scheme of AKU-0,4kV

The advantages include:

• automatically monitors the change in the reactive power of the load in the network and in accordance with the given value of cos φ;

• generation of reactive power to the network is excluded;

• all main parameters of the network are visually monitored;

• a system of emergency shutdown of the condenser installation and warning of service personnel is provided;

The switching time of one stage is no more than 3 minutes. If it is necessary to reduce the discharge time of capacitors, special discharge devices are used.

NCU are usually used in networks of 6 kV and above (but 0.4 kV is not an exception). The rated power is also set by stages from capacitors, but unlike the ACU, all stages are turned on at once or stage switching is possible only in manual mode. The regulator is absent, or it may be, but it is used only as a protection unit for the capacitor unit.

Such installations have a number of advantages and disadvantages compared to the 6kV battery, the advantages include:

• lower cost than ACU, due to the absence of vacuum contactors and protective devices assigned to them;

• the service life of capacitors is longer, therefore there are no frequent commutations and accompanying peak shock currents up to 100 x Inom;

• ease of operation due to the absence of mechanical moving parts;

• lower operating costs;

• no need for constant control;

• regulation and prevention of switching devices by personnel;

• smaller dimensions of the installation in comparison with ACU

As for the disadvantages, the most important of them is the possible generation of reactive power in the energy system, which will cause serious problems.

Figure 5 shows the structural diagram of the 10 kV NCU.

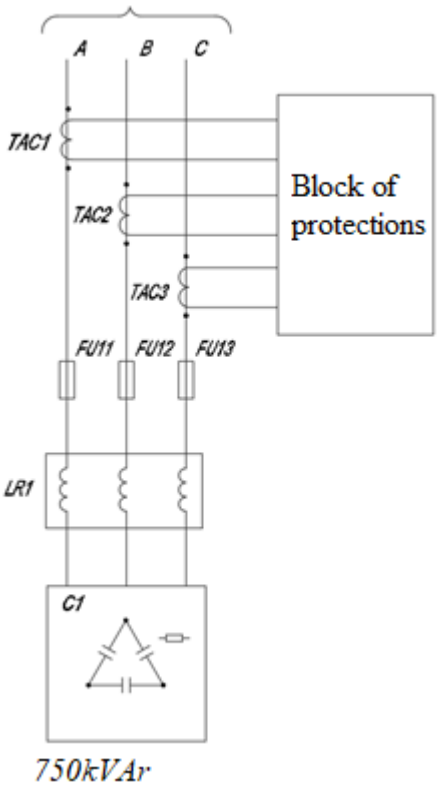


Figure 5. Structural diagram of the 10 kV NCU

STATKOM (static synchronous compensator) is a fast-acting device capable of emitting or absorbing reactive current and thus regulating the voltage at the point of connection to the power grid.

It is classified as a flexible alternating current transmission system (FACTS). The technology is based on the "Voltage Source Converter" (voltage source converter) with semiconductor gates in a modular multi-level configuration [12].

The main schematic configuration of STATKOM includes a set of filters of higher harmonics of filter-compensating circuits, which are permanently connected to the network or switched by switches, and included in parallel with them in a triangle of three phases of thyristor-controlled reactors - thyristor reactor group (TRG) Figure 6.

The firing angle of thyristors TRG can be quickly changed so that the current in the reactor monitors the load current or the reactive power in the power system.

The STATKOM control and protection system provides quick compensation of the reactive power of the load and maintenance of the adjustable parameter in accordance with the set point, performs protection of the STATKOM equipment, control and signaling of failures and can be modified for specific EM requirements.

The response time of the STATKOM control system to a change in the regulated parameter is 5 ms for arc steel furnace type loads and 25-100 ms for general industrial loads of network substations.

STATCOM has a level of automation that ensures its operation without the constant presence of personnel. STATKOM is controlled from a remote control panel or from an automatic technological process control system through an external interface.

The nominal power and STATKOM scheme is selected for a specific object depending on the parameters of the power supply system, the type and power of the compensated load, and the requirements for the quality of electricity and the functions performed. For each individual case, the non-circulating power of the TRG and filter-compensating circuits is calculated and their composition is determined.

As already mentioned above, the massive production of photovoltaic energy connected to the network creates many problems, such as voltage stability, compensation of reactive power of local loads, operational reliability, etc.

In order to implement the compensation of the reactive power of local loads, reduce the loss of electrical energy and improve the controllability of the photovoltaic system, it is proposed to consider the option of installing STATKOM 35kV together with SPP.

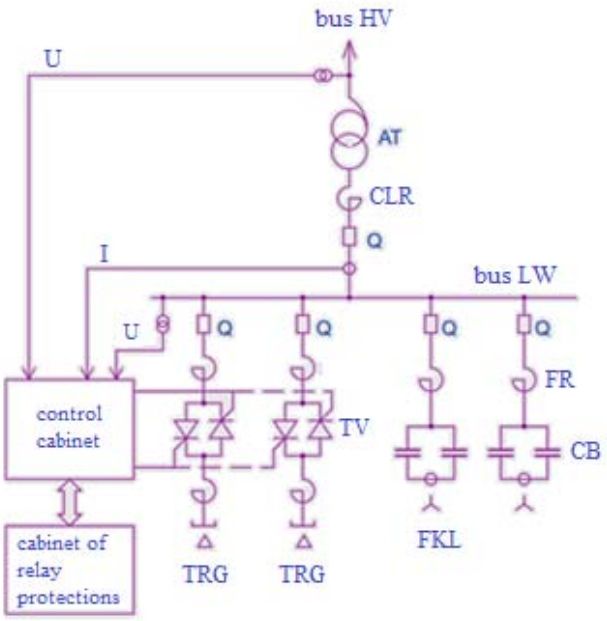


Figure 6. An example of execution of STATKOM 35kV

(AT – autotransformer; CLR – current-limiting reactor; Q – switch; FR – filter reactor; TV – thyristor valve; TRG – thyristor-reactor group; FKC – filter compensating circuit; CB – capacitor bank)

In DSTU 8635:2016 [13], there are requirements for voltage magnitude, quality of electrical energy and regulation of reactive power of SPP, namely:

• Permissible frequency and voltage ranges of electricity produced by a photovoltaic plant (FPP) must meet the requirements for frequency and voltage levels in normal and emergency modes of operation of the power system in accordance with GOST 13109 and DSTU EN 50160:2023. At the same time, the generation capacity of the FPP should be reduced by the minimum possible amount;

• Indicators of the quality of electric energy produced by the FPP at the connection point must meet the requirements for the quality of electricity in accordance with GOST 13109 and DSTU EN 50160:2023;

• If necessary, the FPP should be equipped with appropriate high-speed means of compensation of reactive power with filters of higher harmonics. The compliance of FPP equipment with the requirements for the quality of electric energy must be confirmed by modeling and/or experimentally;

• The photovoltaic plant must be equipped with reactive power regulation functions. The current settings of the parameters for regulating the reactive power and voltage must be determined before putting the FPP into operation by the owner of the electric networks (and, if necessary, by the system operator);

• The photovoltaic plant must be able to fix power factor settings with an accuracy of 0.001 kVA. If the power factor setting for a FPP with a capacity of more than 25 MW is changed, then such changes must be accepted within 2 seconds and take effect no later than 30 seconds after receiving the order to change the setting. The error of the performed adjustment and set settings should not exceed ± 2% of the setpoint value or ± 0.5% of the nominal power, depending on which of the criteria is stricter.

Therefore, based on the above-mentioned State Standard of Ukraine, the introduction of reactive power compensation devices is a necessity for the normal functioning of the SPP and its integration into the EN.

Let's consider how the parameters of the normal EN mode (Figure 7) will change when STATKOM 35 kV 6.5 MVAr is implemented (the power is chosen to cover the local reactive consumption) together with a 20 MW SPP in one of the districts of Odesa Region (Figure 8).

For modeling, the maximum instantaneous values from the summer measurements of electrical energy were taken.

The SPP generates a power of 20MW, this power fully covers the node's active energy needs, and the rest of the electrical energy from the SPP goes to the balancing node in EN through the lines from substation 4.

This option is not the best from a technical and economic point of view, because the generated electrical energy does not remain in the node, but its remains go through the 35kV feeder lines to the EN balancing node.

As can be seen from the simulation in Figures 9 and 10, the flow of current in the feeder power lines is significantly reduced, and therefore the losses of electrical energy are reduced, the lines are unloaded and the voltage on the substations, which are closer to the balancing node, is increased.

This greatly affects the technical and economic efficiency of the joint operation of EN and RES.

In addition, as is known from [14] – [16], SPP inverters are sources of harmonic distortions, therefore STATKOM performs an additional function of a harmonic filter, thereby improving power quality indicators.

Also, according to the simulation results in [17], it can be stated that STATKOM is one of the effective tools for solving problems with voltage deviation.

As an example, STATCOM is installed at such facilities - SVG-STATCOM 35 kV 4x8 MVAr, FC 35 kV 4x5 MVAr for Pokrovska SPP LLC (DTEK VDE LLC).

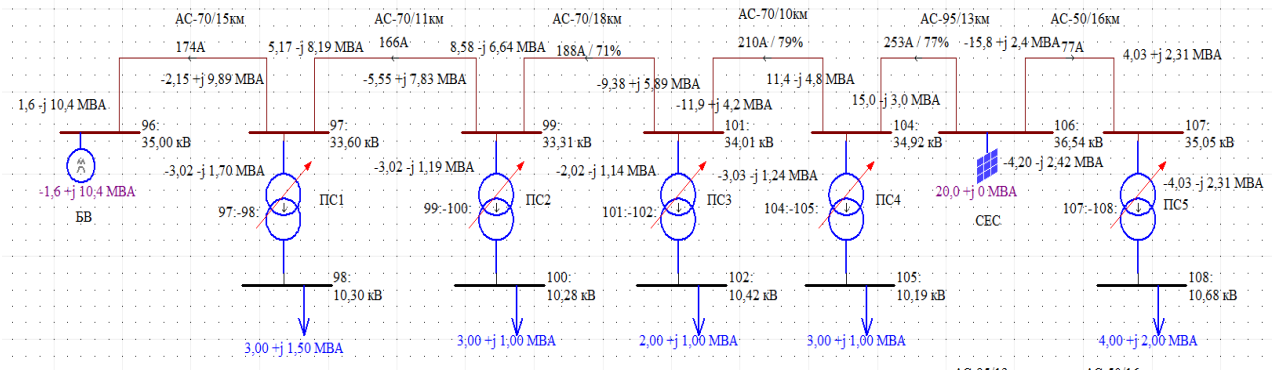


Figure 7. Scheme of the normal regime before the introduction of STATKOM

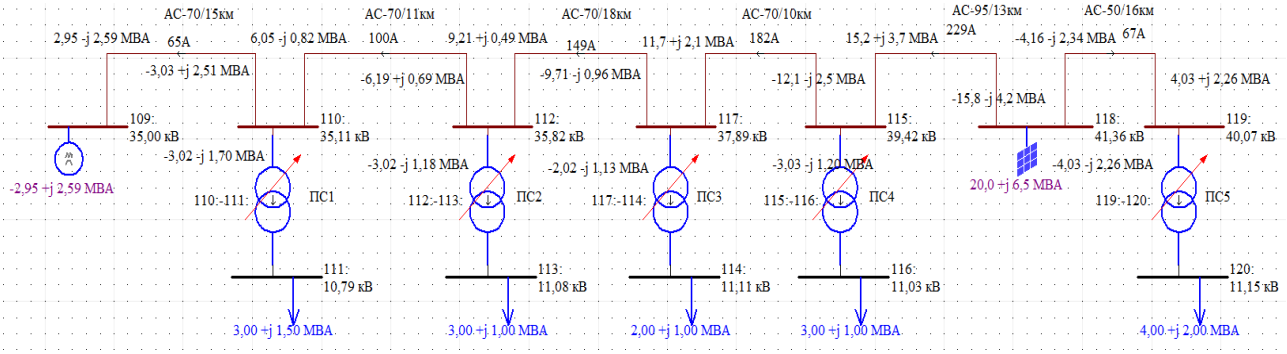


Figure 8. Scheme of normal mode after implementation of STATKOMCTATKOM

U кВ	фаза град	P МВт	Q Мвар	Pг МВт	Qг Мвар	Назва вузла
35.000	0.0	0.000	-0.000	-1.576	10.424	96:
33.601	3.7	0.000	-0.000	0.000	-0.000	97:
10.303	1.5	3.000	1.500	0.000	0.000	98:
33.309	6.7	0.000	-0.000	0.000	-0.000	99:
10.280	4.5	3.000	1.000	0.000	0.000	100:
10.417	10.1	2.000	1.000	0.000	0.000	102:
34.924	15.5	0.000	-0.000	0.000	-0.000	104:
10.192	12.3	3.000	1.000	0.000	0.000	105:
34.013	12.3	0.000	-0.000	0.000	-0.000	101:
36.542	18.1	0.000	-0.000	20.000	-0.000	106:
35.049	18.0	0.000	-0.000	0.000	-0.000	107:
10.682	15.3	4.000	2.000	0.000	0.000	108:

Струм А	Рпоч МВт	Qпоч Мвар	Ркін МВт	Qкін Мвар	Рнх МВт	Qнх Мвар	Назва вітки
188	-3.024	-1.704	3.000	1.500	0.008	0.052	97:-98:
174	1.576	-10.424	-2.148	9.890	0.000	0.000	96:-97:
178	-3.022	-1.187	3.000	1.000	0.008	0.051	99:-100:
166	5.171	-8.186	-5.555	7.828	0.000	0.000	97:-99:
124	-2.018	-1.142	2.000	1.000	0.006	0.038	101:-102:
179	-3.029	-1.238	3.000	1.000	0.007	0.040	104:-105:
210	11.396	-4.752	-11.950	4.235	0.000	0.000	101:-104:
188	8.577	-6.641	-9.378	5.893	0.000	-0.000	99:-101:
253	14.979	-2.998	-15.799	2.416	0.000	0.000	104:-106:
242	-4.034	-2.308	4.000	2.000	0.009	0.057	107:-108:
77	-4.201	-2.416	4.034	2.308	0.000	0.000	106:-107:

Сумарне генерування	18.424	10.424
Сумарне генерування PV	20.000	-0.000
Сумарне навантаження	15.000	6.500
Втрати поздовжні	3.385	3.686
Втрати поперечні	0.039	0.238
Сумарний небаланс	0.000	-0.000

Figure 9. Network parameters before the introduction of STATKOM

U кВ	фаза град	P МВт	Q Мвар	Pг МВт	Qг Мвар	Назва вузла
35.000	0.0	0.000	-0.000	-2.945	2.588	109:
35.108	1.6	0.000	-0.000	0.000	-0.000	110:
10.789	-0.4	3.000	1.500	0.000	0.000	111:
35.814	2.9	0.000	-0.000	0.000	-0.000	112:
11.082	1.0	3.000	1.000	0.000	0.000	113:
11.667	3.8	2.000	1.000	0.000	0.000	114:
39.419	6.9	0.000	-0.000	0.000	-0.000	115:
11.577	4.5	3.000	1.000	0.000	0.000	116:
37.892	5.5	0.000	-0.000	0.000	-0.000	117:
41.361	8.0	0.000	-0.000	19.996	6.498	118:
40.063	7.9	0.000	-0.000	0.000	-0.000	119:
12.304	5.9	4.000	2.000	0.000	0.000	120:

Струм А	Рпоч МВт	Qпоч Мвар	Ркін МВт	Qкін Мвар	Рнх МВт	Qнх Мвар	Назва вітки
179	-3.023	-1.696	3.000	1.500	0.009	0.057	110:-111:
65	2.945	-2.588	-3.024	2.514	0.000	0.000	109:-110:
165	-3.021	-1.176	3.000	1.000	0.010	0.059	112:-113:
100	6.047	-0.819	-6.186	0.688	0.000	0.000	110:-112:
111	-2.017	-1.130	2.000	1.000	0.008	0.047	117:-114:
158	-3.026	-1.204	3.000	1.000	0.008	0.051	115:-116:
181	11.726	2.085	-12.141	-2.472	0.000	0.000	117:-115:
149	9.208	0.488	-9.709	-0.955	-0.000	0.000	112:-117:
229	15.167	3.676	-15.839	-4.153	0.000	0.000	115:-118:
210	-4.031	-2.264	4.000	2.000	0.012	0.074	119:-120:
67	-4.157	-2.345	4.031	2.264	0.000	0.000	118:-119:

Сумарне генерування	17.052	9.086
Сумарне генерування PV	19.996	6.498
Сумарне навантаження	15.001	6.500
Втрати поздовжні	2.004	2.298
Втрати поперечні	0.047	0.288
Сумарний небаланс	-0.000	0.000

Figure 10. Network parameters after the implementation of STATKOM

V. CONCLUSIONS

The installation of STATKOM 6.5 MVAr helped to relieve the power grid lines by 109 A, and in percentage terms to reduce the load on the lines:

Table 1. Reduction of line load

Line name	BV-PS1	PS1-PS2	PS2-PS3	PS3-PS4	PS4-SPP	SPP-PS5
Before, %	65,6	62,8	70,9	79,1	76,5	36,5
After, %	24,4	37,9	56,1	68,5	69,3	31,7
Difference, %	41,2	24,9	14,8	10,6	7,2	4,8

Citing [18] - the company "DTEK VDE" completed the process of additional adjustment of reactive power compensation devices (Statcom) at its enterprises, designed to solve the issue of low-frequency oscillation damping (POD - power oscillation damping) in the UES network of Ukraine, which was one from the conditions of its synchronization with ENTSO-E, as well as the implementation of Statcom, this will contribute to the expansion of Ukraine's export opportunities in the ENTSO-E network by 730 MW (currently, the technical possibility for export from the united within the framework of integration with ENTSO-E systems of Ukraine/Moldova to Europe is 400 MW).

This indicates a real perspective of the implementation of STATKOM for EN of Ukraine

Therefore, the use of controlled reactive power compensation devices:

• will allow to increase the carrying capacity of existing power lines and transformers [19] – [20];

• will reduce the loss of electrical energy, which is very expensive in monetary terms;

• will solve the problem with stabilization or loss of voltage in EN;

• will improve power quality indicators.

All of the above contributes to the acceleration of the integration of RES into the EN of Ukraine, especially when most of the EM schemes where RES is integrated are of the radial type.

REFERENCES

[1] Swart, R.J., Coppens, C., Gordijn, H. (2009). Europe's onshore and offshore wind energy potential: An assessment of environmental and economic constraints. European Environment Agency, 90. DOI: 10.2800/11373

[2] International Energy Agency. (2010). Technology Roadmap Solar photovoltaic energy. International Energy Agency, 48. DOI: 10.1787/9789264088047

[3] Yandulskyi, O.S., Trunin, G.O. (2013). Approaches to the optimal management of the modes of distribution electric networks with distributed generation. Bulletin of the Vinnytsia Polytechnic Institute, 62-64.

[4] Trunin, G.O. (2014). Zones of effective voltage regulation by distributed generation sources with inverter connection in the distribution network. Technical electrodynamics, 50-52.

[5] Yandulskyi, O.S., Trunin, G.O. (2015). An approach to optimal voltage regulation in the distribution electric network with a source of distributed generation, taking into account their ownership to one or different owners. Bulletin of the Azov State Technical University. Technical sciences, 121-129.

[6] Ackerman, T., Knyazkin, V. (2000). Interaction between distributed generation and the distribution network. Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia Pacific IEEE/PES, 1357—1362.

[7] Ackermann, T. (2007). Distributed resources and re-regulated electricity markets. Electric Power Systems Research, 1148-1159. DOI: 10.1016/j.epsr.2006.08.006

[8] Wang, S. (2009). Distributed generation and its effect on distribution network system. Electricity Distribution - Part 1. 20th International Conference and Exhibition, 1-4. DOI: 10.1049/cp.2009.0560

[9] Dolezal, L., Sautarius, R., Tlusty, J. (2003). The effect on dispersed generation op power quality in distribution system. Quality and Security of Electric Power Delivery Systems. CIGRE/IEEE PES International Symposium, 204-207.

[10] Esposito, G., Golovanov, N., Lazaroiu, C., Zaninelli, D. (2007). Impact of Embedded Generation on the Voltage Quality of Distribution Networks. Electrical Power Quality and Utilization, EPQU, 1-6.

[11] Baggini, A.B. (2008). Handbook of Power Quality. Chichester, England; Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 642.

[12] Singh, B., Saha, R., Chandra, A., Al-Haddad, K. (2009). Static synchronous compensators (STATCOM). IET Power Electronics, 297-324.

[13] DRSTU 8635:2016. (2016). Solar energy. Sites for photovoltaic stations. Connection of stations to the electric power system: chynnyy z 2016.04.05. Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine, 22.

[14] Lezhnyuk, P.D. (2015). The influence of SES inverters on the indicators of the quality of electric energy. Bulletin of the Khmelnytskyi National Technical University. Series: Technical sciences, 134-139.

[15] Enslin, J. (2004). Harmonic interaction between a large number of distributed power inverters and the distribution network. IEEE Transactions on power electronics, 1586-1593.

[16] Bordakov, M. M. (2019). Compensation of reactive power by a solar power plant and the effect of this

process on the operation of the central electric network. Renewable energy, 31– 35.

[17] Zakharov, A. M. (2014). Reduction of voltage deviations at the points of connection of powerful solar power plants to electrical networks. Technical electrodynamics, 44-46.

[18] Article on implementation [Electronic resource] // Interfax. – 2023. - Resource access mode: https://interfax.com.ua/news/greendeal/938512.html.

[19] Danylchenko, D.O., Kuznetsov, D.S. (2022). Use of reactive power compensation devices at stations with renewable energy sources. ISSN 2222-2944. Information technologies: science, engineering, technology, education, health, 70.

[20] Shevchenko, S., Danylchenko, D., Kuznetsov, D., Petrov, S. (2021). Use of Capacitor Batteries to Improve the Quality of Electrical Energy. IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), 666 – 669 .

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ ТА ВЗАЄМОДІЇ РОЗПОДІЛЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ З ЛОКАЛЬНОЮ ЕЛЕКТРИЧНОЮ МЕРЕЖЕЮ

ДАНИЛЬЧЕНКО Д.О. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри передачі електричної енергії Національного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: dmytro.danylchenko@khpi.edu.ua, ORCID: 0000-0001-7912-1849;

КУЗНЕЦОВ Д.С. аспірант кафедри передачі електричної енергії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: dmytro.kuznetsov@ieee.khpi.edu.ua, ORCID: 0009-0003-1543-7854;

Мета роботи. *Спостерігається тенденція переходу від чисто централізованого електропостачання до комбінованого, зростає кількість місцевих розосереджених джерел електроенергії безпосередньо в розподільних електричних мережах. Розподільчі електричні мережі перетворюються в мережу з ознаками, характерними для локальної електричної системи, яка отримує живлення як від власних розподільчих електричних мереж, так і від централізованого джерела. Відновлювальна енергетика має ряд переваг, однак є і недоліки. Серед них - ускладнення функціонування електричних мереж при зростанні в них встановлених потужностей відновлюваних джерел електроенергії та нестабільність генерування через природну їх залежність від метеорологічних умов, якщо про технічні недоліки то це стосується - синусоїдності напруг і струмів та відхилень напруги, забезпечення якості електроенергії яке напряму залежить від забезпечення балансу по активній та реактивній потужності в електричній системі. Метою цієї статті є аналіз ефективності роботи пристроїв компенсації реактивної потужності як інструменту для зниження порогу інтеграції джерел розподіленої генерації в електричні мережі України. Завдання полягає в дослідженні зниження інтеграційного порогу для розподіленої генерації.*

Методи дослідження. *Математичне моделювання електричної системи з елементами розподіленої генерації та пристроями компенсації реактивної потужності. Досліджується вплив роботи пристроїв компенсації реактивної потужності на параметри електричної мережі. Порівняльний аналіз параметрів мережі та їх зміна при впровадженні розподіленої генерації разом з пристроями компенсації реактивної потужності та без них.*

Отримані результати. *Отримані результати показують, що застосування пристроїв компенсації реактивної потужності дозволяє підвищити пропускну спроможність діючих ліній електропередач і трансформаторів, що особливо ціно коли більшість схем електромережі куди інтегрується розподілена генерація має радіальний тип, тобто, фактично знижує інтеграційний поріг для відновлювальної генерації в електричні мережі. Немало важливим фактором є те що, впровадження пристроїв компенсації реактивної потужності разом з розподіленою генерацією вирішує проблему зі стабілізацією та втратою напруги в електричних мережах, а також покращує показники якості електричної енергії.*

Наукова новизна. *Отримав подальший розвиток метод вибору компенсаторів реактивної потужності для розподільчих мереж, що відрізняється від існуючих врахуванням наявності відновлюваних джерел енергії різних типів, що дозволяє підвищити ефективності взаємодії локальної електричної мережі з інтегрованою до неї відновлювальною генерацією.*

Практична цінність. *Полягає в зниженні інтеграційного порогу в електричні мережі джерел розподіленої генерації, за рахунок впровадження разом з ними пристроїв компенсації реактивної потужності, що впливає на ряд технологічних параметрів в вузлі - зниження втрат потужності та напруги, стабілізація та управління напругою, покращення показників якості електричної енергії.*

Ключові слова: джерела розподіленої генерації; відновлювальна енергетика; пристрої компенсації реактивної потужності; електрична мережа; втрати; впровадження.

УДК 621.316.925

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУГИ НЕСИМЕТРІЇ У ТРИФАЗНИХ МЕРЕЖАХ З РІЗНИМИ РЕЖИМАМИ НЕЙТРАЛІ

СТЕПАНЕНКО Ю.В. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електроенергетики Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: stepanenko.yu.v@nmu.one, ORCID: 0000-0001-5999-1927

Мета роботи. *Визначення впливу параметрів мереж з різними режимами нейтралі на напругу нульової послідовності.*

Методи дослідження. *Методологія дослідження базується на загальній теорії електротехніки і, зокрема, на методі симетричних складових.*

Отримані результати. *Розроблено математичну модель для встановлення характеру зміни напруги нульової послідовності для різних режимів нейтралі мережі. Встановлено значення напруг нульової послідовності та кутів між вектором напруги фази з несиметрією та вектором напруги нульової послідовності залежно від ємнісної несиметрії, ємності та активного опору ізоляції мережі для різних режимів нейтралі.*

Наукова новизна. *Проведені дослідження показали, що найбільше зростання напруги нульової послідовності відзначається при ємності несиметрії, яка становить 10...30% від ємності ізоляції мережі. Причому найбільш суттєвий вплив відносна ємнісна несиметрія ізоляції при зміні значень ємності мережі відносно землі надає на величину напруги нульової послідовності в мережах з компенсованою нейтраллю і практично виключається при повністю ізольованій нейтралі мережі відносно землі.*

Практична цінність. *Для реальних параметрів мережі за результатами теоретичних та експериментальних досліджень можна судити про працездатність існуючих засобів захисту та використовувати їх при розробці нових принципів і пристроїв захисту.*

Ключові слова: напруга; нульова послідовність; несиметрія; ізольована нейтраль; компенсована нейтраль; мережа з резистором у нейтралі.

I. ВСТУП

В електричних мережах гірничих підприємств напругою понад 1 кВ відповідно до [1] та галузевих правил безпеки передбачається застосування двоступінчастого захисту від однофазних замикань на землю з дією на відключення.

Дослідження свідчать, що у кар'єрних розподільних мережах другий ступінь має досить великий відсоток хибних спрацьовувань (10...30 %).

Однією з причин неправильного спрацьовування захисту слід вважати появу напруги несиметрії за відсутності у мережі замикання на землю.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

В даний час найбільш поширеними типами захисту від замикань на землю (перший ступінь) є так звані спрямовані захисти [2], [3].

За відгуками енергослужб підприємств, з урахуванням середньої кількості спрацьовувань пристроїв, відсотка групових відключень при стійких замиканнях, працездатність першого ступеня захисту їх не задовольняє.

За оцінкою експлуатаційників під час роботи захисту мають місце випадки відмови герконових реле та напівпровідникових приладів. До того ж зазначаються часті відмови захисту при дугових замиканнях на землю, а також неселективні відключення.

Другий ступінь (резервний) захисту від замикань на землю виконується, в основному, на максимальних реле напруги, які реагують на рівень напруги нульової послідовності.

Працездатність цього ступеня захисту на підставі кількості спрацьовувань при зафіксованих та незафіксованих відмовах першого ступеня оцінена енергослужбами як незадовільна.

Захист спрацьовує при групових та дугових замиканнях. Уставка за часом другого ступеня не дозволяє відстроюватися від двох ступенів захистів, що працюють за напрямом нульової послідовності.

Другий ступінь виявляється більш чутливим за перший ступінь захисту по струму.

На підставі результатів опитування енергослужб підприємств можна відзначити: досвід експлуатації першого та другого ступенів захисту від замикань на землю відображає їхню незадовільну роботу, що призводить до невиправданих відключень джерела живлення (секції шин підстанції) і, відповідно, пов'язано зі значними економічними збитками від простою великої кількості гірничодобувних машин.

III. МЕТА РОБОТИ

Для правильного вибору засобів захисту, оцінки можливості створення нових принципів та пристроїв захисту потрібно дослідити вплив несиметрії на амплітудні та фазові параметри напруги нульової послі-

© Степаненко Ю.В., 2024
DOI 10.15588/1607-6761-2024-2-3

довності при різних режимах роботи нейтралі мережі.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГУ МАТЕРИАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

У потужній енергетичній системі трикутник лінійних напруг утворює жорстку систему. Його положення щодо точки відліку визначається провідностями на землю на затискачах джерела та в інших точках системи.

Симетричному трикутнику лінійних напруг відповідає симетрична зірка фазових напруг [4], [5]. Однак, це справедливо тільки при нульовому потенціалі нейтралі відносно землі, що має місце при повній симетрії ізоляції фаз, яка складається з активного опору та ємності мережі.

Залежність параметрів нульової послідовності від активних опорів ізоляції розглянута досить детально [6], [7].

Цікавим є дослідження впливу ємностей фаз мережі відносно землі. Величина цих ємностей повністю визначає положення трикутника лінійних напруг відносно землі.

Ємності між фазами не впливають на потенціал системи щодо землі: вони утворюють шлях для взаємного обміну струму між фазами, створюючи додаткове навантаження в контурі, який складається з проводів та обмоток трансформатора.

З іншого боку, для зарядних струмів, що течуть на землю, немає шляху для повернення, якщо система не з'єднана із землею. За першим законом Кірхгофа остання відіграє роль вузла схеми і сума всіх струмів, що притікають до нього, дорівнює нулю.

Позначивши три вектори напруги відносно землі U_{Ae}, U_{Be}, U_{Ce}, отримаємо:

$$\dot{U}_{Ae} \cdot Y_A + \dot{U}_{Be} \cdot Y_B + \dot{U}_{Ce} \cdot Y_C = 0 \qquad (1)$$

Нехай деяка точка, що лежить всередині трикутника лінійних напруг, має потенціал землі. Напруги відносно землі, напруги відносно нейтралі та зміщення нейтралі пов'язані такими співвідношеннями [4], [5], [8]:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{Ae} &= \dot{U}_A + \dot{U}_0 \\ \dot{U}_{Be} &= \dot{U}_B + \dot{U}_0 \\ \dot{U}_{Ce} &= \dot{U}_C + \dot{U}_0 \end{aligned} \qquad (2)$$

Вони справедливі для будь-якої форми трикутника напруги, а не тільки симетричної. Сума трьох фазних потоків трифазних силових трансформаторів точно дорівнює нулю.

Це справедливо і для напруг, індукованих цими потоками в трьох фазах, що призводить до співвідношення, яке визначає положення нульової точки:

$$\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C = 0 \qquad (3)$$

Співвідношення (2) та (3) дозволяють надати виразу (1) такої інтерпретації. Струми системи на землю

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= (\dot{U}_A + \dot{U}_0) \cdot Y_A \\ \dot{I}_B &= (\dot{U}_B + \dot{U}_0) \cdot Y_B \\ \dot{I}_C &= (\dot{U}_C + \dot{U}_0) \cdot Y_C \end{aligned}$$

можуть бути перегруповані та представлені у вигляді:

$$\left(\dot{U}_A \cdot Y_A + \dot{U}_B \cdot Y_B + \dot{U}_C \cdot Y_C\right) + \dot{U}_0 \cdot \left(Y_A + Y_B + Y_C\right) = 0 \qquad (4)$$

Вираз у перших дужках є струмом, який протікав би на землю, якби напруги проводів відносно землі дорівнювали напругам фаз відносно нейтралі.

Сума двох членів виразу (4) згідно із законом Кірхгофа дорівнює нулю. Якщо ємності на землю C_A, C_B, C_C рівні між собою, перший член рівняння на підставі (3) зникає.

При цьому і другий член повинен стати рівним нулю, а, отже, і $U_0 = 0$. Таким чином, нейтраль симетричної трифазної системи, що знаходиться в рівновазі, має потенціал землі.

При з'єднанні одного з трьох проводів фаз із землею зміни лінійної напруги не відбувається, якщо джерело живлення досить потужне.

Для дослідження напруги нульової послідовності необхідно скласти схему заміщення розподільної мережі, яка представляє собою сукупність схем заміщення окремих елементів з урахуванням наступних припущень [8]:

1) система ЕРС джерела живлення симетрична та не містить вищих гармонійних;

2) рівномірно розподілені ємності та опори ізоляції фаз мережі відносно землі замінені зосередженими;

3) активні та індуктивні опори проводів ліній прийняті рівними нулю;

4) індуктивність дроселя, що компенсує, не залежить від прикладеної напруги, а активні втрати імітуються активною провідністю;

5) активний опір і індуктивність обмоток трансформатора, що живить, рівні нулю.

З урахуванням вищевикладеного, схеми заміщення розподільної мережі без урахування навантаження для дослідження напруги нульової послідовності в режимі, що встановився, при різних режимах роботи нейтралі мають вигляд, представлений на рис.1 і 2.

На схемах заміщення розподільної мережі позначено:

Y_A, Y_B, Y_C – комплексні провідності ізоляції фаз відносно землі;

$Y_H = Y_K$ – провідність пристрою, що компенсує;

$Y_H = Y_R$ – провідність резистора в нейтралі;

y – провідність, яка визначає несиметрію ізоляції

мережі відносно землі.

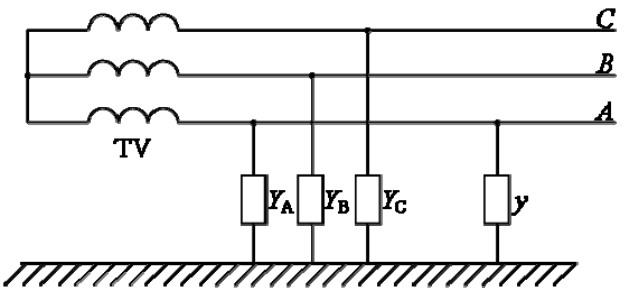


Рисунок 1. Схема заміщення мережі з ізольованою нейтраллю для дослідження U_0

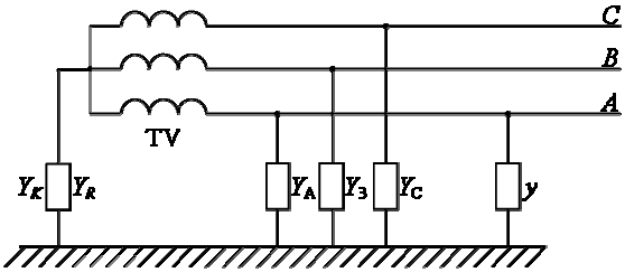


Рисунок 2. Схема заміщення компенсованої мережі та мережі з резистором у нейтралі

При складанні математичної моделі передбачається, що:

• у нормальному режимі роботи мережі провідності кожної фази рівні між собою;

• фазні ЕРС мережі рівні за величиною і зсунуті одна відносно одної на 120°;

• потужність трансформатора, що живить, не обмежена.

Такі припущення, враховуючи відносно невелику протяжність ліній розподільних мереж, що відходять, дозволяють спростити математичні виведення і перетворення, але при цьому практично не впливатимуть на точність кінцевих результатів.

Для представленої на рис. 1 схеми заміщення згідно з першим законом Кірхгофа можна записати:

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C + \dot{I}_З = 0$$

або

$$\dot{U}_{Ae} \cdot Y_A + \dot{U}_{Be} \cdot Y_B + \dot{U}_{Ce} \cdot Y_C + \dot{U}_{Ae} \cdot y = 0$$

З урахуванням $Y_A = Y_B = Y_C = Y$ і виразів (2) та (3) отримуємо:

$$(3 \cdot Y + y) \cdot \dot{U}_0 + y \cdot \dot{U}_A = 0 \qquad (5)$$

Замінивши у виразі (5) провідності їх значеннями $Y = 1/R + j\omega C$ та $y = j\omega C_Д$ отримаємо вираз (6) для напруги нульової послідовності, виражений через параметри електричної мережі:

$$\dot{U}_0 = -\frac{\dot{U}_A \cdot j\omega \cdot C_Д}{3/R + j\omega \cdot (3C + C_Д)} \qquad (6)$$

$$\dot{U}_0 = -\frac{U_A \cdot \omega \cdot C_Д}{(3/R)^2 + \omega^2 \cdot (3C + C_Д)^2} \cdot \left[\omega \cdot (3C + C_Д) + j(3/R)\right]$$

де R і C – відповідно активний опір та ємність ізоляції однієї фази мережі відносно землі; $C_Д$ – ємність несиметрії.

Діюче значення напруги нульової послідовності при несиметрії в мережі з ізольованою нейтраллю, виражене через фазну напругу та параметри ізоляції мережі:

$$U_0 = U_Ф \frac{\omega \cdot C_Д}{\sqrt{(3/R)^2 + (3 \cdot \omega \cdot C + \omega \cdot C_Д)^2}}$$

Кут між вектором напруги фази з несиметрією та вектором напруги нульової послідовності визначається з виразу:

$$\varphi_1 = 180° + arctg \frac{3}{\omega \cdot R \cdot (3C + C_Д)}$$

Результати розрахунків параметрів напруги нульової послідовності представлені графічними залежностями.

На рис. 3 наведені характерні криві зміни значення напруги зміщення нейтралі при різних параметрах розподільної мережі, ємнісної несиметрії та їх поєднаннях.

Криві зміни кута вектора напруги нульової послідовності представлені на рис. 4.

Для мережі з компенсованою нейтраллю згідно з першим законом Кірхгофа:

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C + \dot{I}_K + \dot{I}_З = 0 \qquad (7)$$

З урахуванням того, що

$$\dot{I}_K = \dot{U}_0 \cdot (1/R_K - j(1/\omega L))$$

напруга нульової послідовності через параметри мережі після відповідних перетворень визначається:

$$\dot{U}_0 = -\frac{\dot{U}_A \cdot j\omega \cdot C_Д}{3/R + 1/R_K + j(3\omega \cdot C + \omega \cdot C_Д - 1/(\omega L))}$$

Діюче значення напруги нульової послідовності при ємнісній несиметрії в мережі з компенсованою нейтраллю визначається виразом:

$$U_0 = U_Ф \cdot \frac{\omega \cdot C_Д}{\sqrt{(3/R + 1/R_K)^2 + (3\omega \cdot C + \omega \cdot C_Д - 1/(\omega L))^2}}$$

Кут між вектором напруги фази з несиметрією та вектором напруги нульової послідовності:

$$\varphi_1 = 180° + arctg\frac{3/R + 1/R_K}{\omega\cdot(3C + C_Д) - 1/(\omega L)}$$

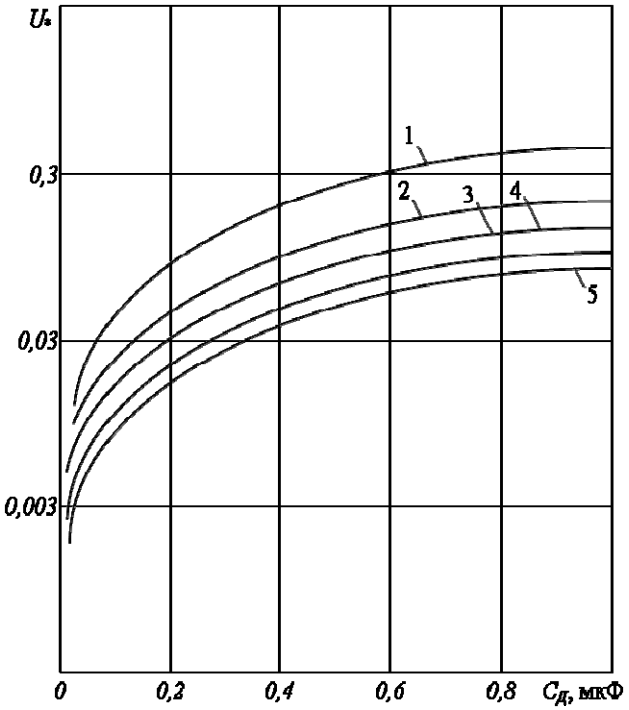


Рисунок 3. Напруга нульової послідовності в мережі з ізольованою нейтраллю в залежності від ємності несиметрії при R = 5 кОм та C (мкФ), що дорівнює: 1 – 1,0; 2 – 2,0; 3 – 3,0; 4 – 4,0; 5 – 5,0

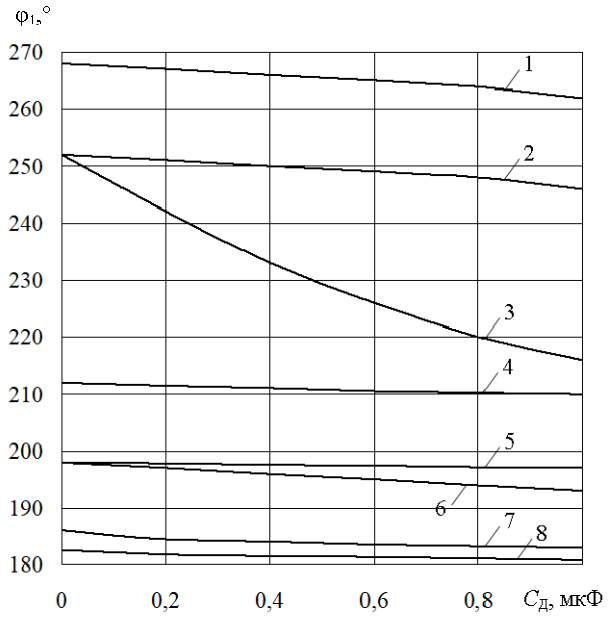


Рисунок 4. Залежність фази напруги нульової послідовності в мережі з ізольованою нейтраллю від ємності несиметрії при C (мкФ) і R (кОм) відповідно рівних: 1 – 0,1 і 1; 2 – 1,0 та 1; 3 – 0,1 та 10; 4 – 5,0 та 1; 5 – 10 та 1; 6 – 1,0 та 10; 7 – 5,0 та 10; 8 – 10 та 10

При розрахунку параметри мережі змінювалися у досить широкому діапазоні можливих значень активного опору ізоляції та ємності відносно землі розподільних мереж.

Режим компенсації ємнісних струмів приймався резонансним і з різним ступенем розладу дугогасної котушки, як у бік недокомпенсації, так і в бік перекомпенсації.

На рис. 5 і 6 наведені характерні залежності зміни величини і кута напруги нульової послідовності для різних параметрів мережі та режимів налаштування дугогасної котушки.

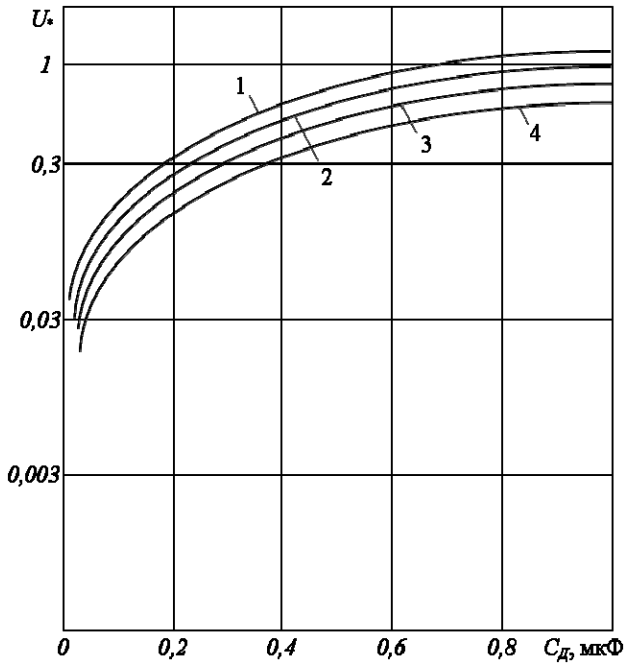


Рисунок 5. Залежність напруги нульової послідовності в мережі з компенсованою нейтраллю при резонансному налаштуванні дугогасної котушки, від ємності несиметрії при C (мкФ) рівному: 1 – 0,1; 2 – 2,0; 3 – 4,0; 4 – 5,0

Для представленої на рис. 2 схеми заміщення розподільної мережі з нейтраллю, заземленою через резистор і приймаючи $Y_R = 1 / R_N$ аналогічно (7) можна записати:

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C + \dot{I}_R + \dot{I}_З = 0$$

Після відповідних підстановок і перетворень отримаємо вираз для визначення напруги нульової послідовності:

$$\dot{U}_0 = -\frac{\dot{U}_A \cdot j\omega \cdot C_Д}{3/R + 1/R_N + j(3\omega\cdot C + \omega\cdot C_Д)}$$

Діюче значення напруги нульової послідовності при ємнісній несиметрії в мережі з резистором у нейтралі визначається:

$$U_0 = U_\Phi \cdot \frac{\omega \cdot C_Д}{\sqrt{(3/R + 1/R_N)^2 + (3\omega \cdot C + \omega \cdot C_Д)^2}}$$

Кут між вектором напруги фази з несиметрією та вектором напруги нульової послідовності визначається за виразом:

$$\varphi_1 = 180° + arctg\frac{3/R + 1/R_N}{3\omega \cdot C + \omega \cdot C_Д}$$

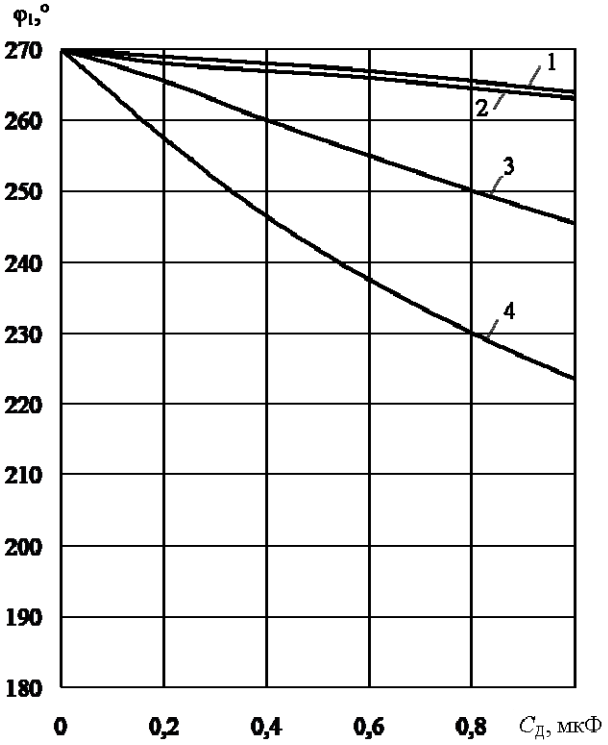


Рисунок 6. Залежність фази напруги нульової послідовності від ємності несиметрії при C (мкФ) і R (кОм) відповідно рівних: 1 – 10 і 1; 2 – 0,1 та 1; 3 – 10 та 10; 4 – 0,1 та 10

При розрахунках діючого значення та кута напруги несиметрії параметри розподільної мережі змінювалися також у досить широких межах. Величина опору резистора в нейтралі визначалася за умови:

$$R_N = (1/3...2/3) \cdot X_C$$

На рис. 7 та 8 наведені криві зміни значення та кута вектора напруги нульової послідовності в мережі з резистором у нейтралі.

Проведений аналіз результатів досліджень дає можливість встановити характер зміни величини напруги нульової послідовності залежно від ємнісної несиметрії, ємності та активного опору ізоляції мережі для різних режимів нейтралі.

У режимі ізольованої нейтралі напруга несиметрії збільшується за зміни величини ємності мережі відносно землі від 10 мкФ до 0,5 мкФ.

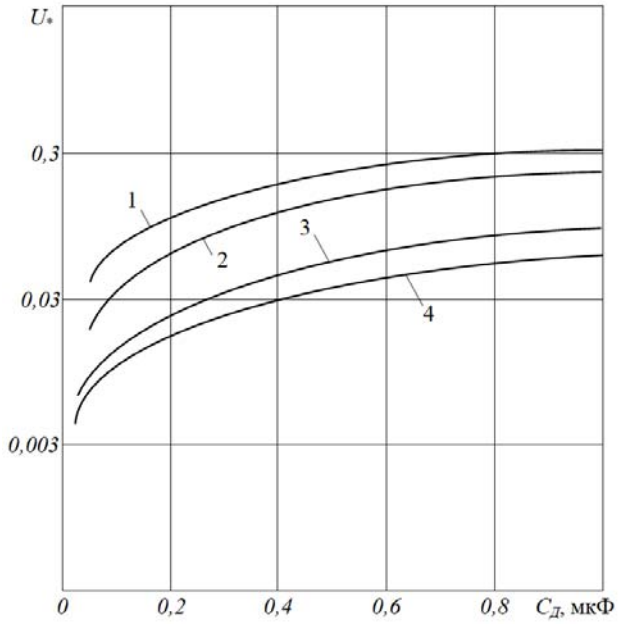


Рисунок 7. Напруга нульової послідовності залежно від ємності несиметрії при R = 5 кОм і C (мкФ), що дорівнює: 1 – 0,5; 2 – 1; 3 – 3,0; 4 – 5,0

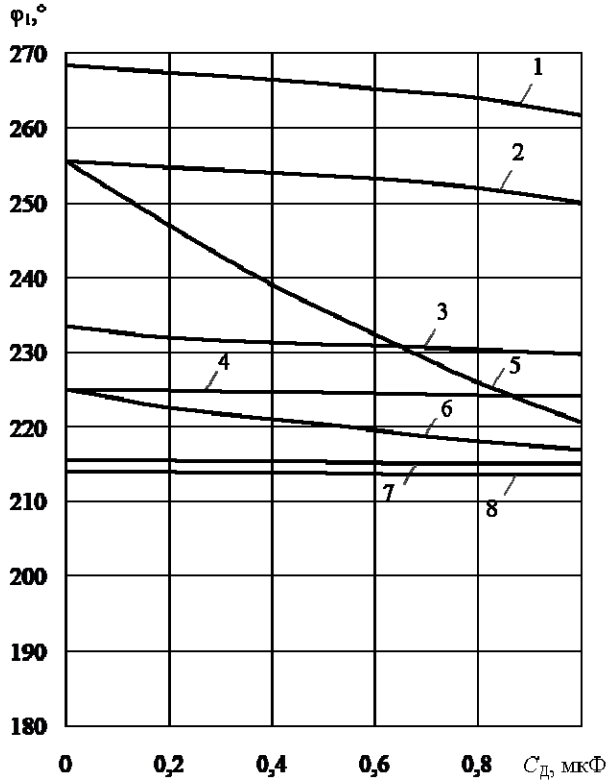


Рисунок 8. Залежність фази напруги нульової послідовності в мережі з резистором в нейтралі від ємності несиметрії при *C* (мкФ) і *R* (кОм) відповідно рівних: 1 – 0,1 і 1; 2 – 1 та 1; 3 – 5 та 1; 4 – 10 та 1; 5 – 0,1 та 10; 6 – 1 та 10; 7 – 5 та 10; 8 – 10 та 10

Значне збільшення напруги нульової послідовності спостерігається у разі зростання ємності несиметрії.

На характер збільшення U_0 залежно від $C_Д$ величини ємності мережі та активного опору ізоляції не впливають.

У мережі з компенсованою нейтраллю при резонансному режимі налаштування дугогасної котушки, напруга нульової послідовності збільшується зі зростанням ємності несиметрії.

У разі збільшення активного опору ізоляції мережі характер зростання напруги зміщення нейтралі змінюється – наростання відбувається плавніше.

У режимі перекомпенсації збільшення ємності несиметрії спричиняє зростання напруги нульової послідовності тим більше, чим вищий активний опір ізоляції мережі.

У режимі недокомпенсації характер зміни напруги зміщення нейтралі аналогічний характеру зміни при резонансному режимі налаштування котушки.

Причому, величина напруги несиметрії дещо менша, ніж при резонансному режимі.

У мережі з резистором у нейтралі напруга нульової послідовності збільшується зі зростанням ємності несиметрії.

При збільшенні активного опору ізоляції мережі також спостерігається зростання напруги зміщення нейтралі.

Із збільшенням ємності мережі відносно землі величина напруги несиметрії знижується.

На величину кута між вектором напруги фази з несиметрією та вектором напруги нульової послідовності також впливає значення ємності несиметрії.

Для різних режимів роботи нейтралі відзначаються такі особливості:

• за інших рівних умов менша зміна кута між вектором напруги фази з несиметрією та вектором напруги нульової послідовності відбувається в мережі з резистором у нейтралі;

• найбільша залежність кута напруги нульової послідовності від параметрів ізоляції спостерігається у мережі з ізольованою нейтраллю.

При різній ємності несиметрії та зміні параметрів мережі в реальних межах, фазовий кут напруги нульової послідовності змінюється в діапазоні від 270° до 180°.

Найбільше зростання напруги нульової послідовності відзначається при ємності несиметрії, яка становить 10...30% від ємності ізоляції мережі.

Подальше збільшення частки ємності несиметрії надає відносно менший вплив на напругу зміщення нейтралі.

Найбільш суттєвий вплив відносна ємнісна несиметрія ізоляції при зміні значень ємності мережі відносно землі надає на величину напруги нульової послідовності в мережах з компенсованою нейтраллю і практично виключається при повністю ізольованій нейтралі мережі відносно землі.

V. ВИСНОВКИ

Аналізуючи наявні методи та засоби захисту від однофазних замикань на землю [9] – [17], , можна сформулювати певні висновки.

Для реальних параметрів мережі за результатами теоретичних та експериментальних досліджень можна судити про працездатність існуючих засобів захисту та використовувати їх при розробці нових принципів і пристроїв захисту.

Можна з упевненістю сказати, що другий ступінь захисту від однофазних замикань на землю при певній ємнісній несиметрії ізоляції мережі буде працювати хибно, тим самим призводячи до відключення джерела живлення і, відповідно, значних економічних збитків через простої технологічного обладнання.

Для виключення хибної роботи другого ступеня захисту необхідно розробляти захисний пристрій, ґрунтуючись на новому принципі, що включає, окрім контролю напруги нульової послідовності, інший параметр, який не залежить від ємності несиметрії ме-

режі.

Захисти першого ступеня при ємнісній несиметрії також можуть помилково працювати, оскільки фазові характеристики параметрів нульової послідовності аналогічні режиму однофазного замикання на землю.

Також варто звернути увагу на можливі додаткові втрати електроенергії у обладнанні при зниженні якості напруги [18], оскільки хибне спрацьовування або відмова пристроїв захисту опосередковано впливають і на показники якості електричної енергії.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

[1] Правила улаштування електроустановок. – К.: Міненерговугілля України, 2017. – 617 с.

[2] Nikander, A., Järventausta, P. Identification of High-Impedance Earth Faults in Neutral Isolated or Compensated MV Networks. IEEE Trans. Power Deliv. 2017, 32, 1187–1195. https://ieeexplore.ieee.org/document/7809183.

[3] N. Gana, N. F. Ab Aziz, Z. Ali, H. Hashim, and B. Yunus, 'A comprehensive review of fault location methods for distribution power system', Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci., vol. 6, no. 1, pp. 185–192, 2017, https://doi.org/10.11591/ijeecs.v6.i1.pp185-192.

[4] Теоретичні основи електротехніки. Усталені режими лінійних електричних кіл із зосередженими та розподіленими параметрами: підручник / Ю.О. Карпов, С.Ш. Кацив, В.В. Кухарчук, Ю.Г. Ведміцький; під ред. проф. Ю.О. Карпова – Вінниця: ВНТУ, 2011. – 377 с.

[5] Теоретичні основи електротехніки Частина 2: Навчальний посібник [Електронний ресурс]/ Л.Ю. Спінул, М.П. Бурик, В.Ю. Лободзинський; О.О. Білецький, КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові данні (1 файл: 9 Мбайт). – К: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 167 с.

[6] Fan, Y., Guang, L., Yu, S., Yongduan, X., Hui, P.; Bingyin, X. Electrical Characteristics of Medium-voltage Distribution Network with Single-phase-to-ground Fault After Arc Extinction. Autom. Electr. Power Syst. 2019, 43, 134. https://doi.org/10.7500/AEPS20180911007.

[7] A. Farughian, L. Kumpulainen, and K. Kauhaniemi, 'Review of methodologies for earth fault indication and location in compensated and unearthed MV distribution networks', Electr. Power Syst. Res., vol. 154, pp. 373–380, 2018, https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.09.006.

[8] R. Willheim, M Waters, "Neutral Grounding in High Voltage Transmission". Elsevier publishing company, New York, 1956.

[9] Petteri Kangasluoma. Medium Voltage Network Residual Earth Fault Current Estimation Methods / Master of Science Thesis. Tampere University. Master's Degree Programme in Electrical Engineering. November 2019, 97 p. https://urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-201911155985.

[10] A. K. Abbas, S. Hamad, and N. A. Hamad, 'Single line to ground fault detection and location in medium voltage distribution system network based on neural network', vol. 23, no. 2, pp. 621–632, 2021, https://doi.org/10.11591/ijeecs.v23. i2.pp621-632.

[11] Altonen, J.; Wahlroos, A.; Vähäkuopus, S.; Oy, E. Application of multi-frequency admittance-based fault passage indication in practical compensated MV-network. CIRED 2017, 2017, 947–951. https://doi.org/10.1049/oap-cired.2017.0967.

[12] Farughian, A.; Kumpulainen, L.; Kauhaniemi, K. Earth Fault Location Using Negative Sequence Currents. Energies 2019, 12, 3759. https://doi.org/10.3390/en12193759.

[13] S. S. Gururajapathy, H. Mokhlis, and H. A. Illias, 'Fault location and detection techniques in power distribution systems with distributed generation: A review', Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 74, no. March, pp. 949–958, 2017, https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.021.

[14] S. Authafa, 'Short Circuit Faults Identification and Localization in IEEE 34 Nodes Distribution Feeder Based on the Theory of Wavelets', Iraqi J. Electr. Electron. Eng., vol. 14, no. 1, pp. 65–79, 2018, https://doi.org/10.37917/ijeee.14.1.7.

[15] Farughian A, Kumpulainen L, Kauhaniemi K. Non-Directional Earth Fault Passage Indication in Isolated Neutral Distribution Networks. Energies. 2020; 13(18):4732. https://doi.org/10.3390/en13184732.

[16] Stojanović, Z.N.; Djurić, M.B. An algorithm for directional earth-fault relay with no voltage inputs. Electr. Power Syst. Res. 2013, 96, 144–149. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2012. 11.004.

[17] M. Baù, R. Benato, S. Dambone Sessa, M. Poli, and C. Quaciari, 'Phase-to-ground fault location methods in unearthed sub-transmission networks: A review', AEIT 2016 - Int. Annu. Conf. Sustain. Dev. Mediterr. Area, Energy ICT Networks Futur., 2016, https://doi.org/10.23919/AEIT.2016.7892761.

[18] Втрати енергії в електрообладнанні при низькій якості напруги. Ю.А. Папаїка, О.Г. Лисенко, М.В. Рогоза, Л.О. Токар, Ю.В. Степаненко // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. Випуск 1/2019 (114), с. 9-13. https://doi.org/10.30929/1995-0519.2019.1.9-13

Стаття надійшла до редакції 05.06.2024

STUDY OF UNBALANCE VOLTAGE IN THREE-PHASE NETWORKS WITH DIFFERENT NEUTRAL MODES

STEPANENKO Y.V. Ph.D, Associate professor, Associate professor of the Department of Electric Power Engineering, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: stepanenko.yu.v@nmu.one, ORCID: 0000-0001-5999-1927

Purpose. *Determination of the influence of network parameters with different neutral modes on the zero-sequence voltage*

Methodology. *The research methodology is based on the general theory of electrical engineering and, in particular, on the method of symmetrical components.*

Findings. *A mathematical model has been developed to establish the nature of the zero-sequence voltage change for different modes of the network neutral. The value of the zero-sequence voltages and the angles between the phase voltage vector with asymmetry and the zero-sequence voltage vector depending on the capacitive asymmetry, capacitance and active resistance of the network insulation for different neutral modes are established.*

Originality. *Conducted studies have shown that the largest increase in the zero-sequence voltage is observed at the asymmetry capacity, which is 10...30% of the network insulation capacity. Moreover, the relative capacitive asymmetry of the insulation when changing the values of the capacitance of the network relative to the ground has the most significant effect on the value of the zero-sequence voltage in networks with a compensated neutral and is practically excluded when the neutral of the network is completely isolated relative to the ground.*

Practical value. *For real parameters of the network, based on the results of theoretical and experimental studies, it is possible to judge the efficiency of existing protection devices and use them in the development of new principles and protection devices.*

Keywords: voltage; zero sequence; asymmetry; isolated neutral; compensated neutral; network with a resistor in the neutral.

REFERENCES

[1] Pravyla ulashtuvannja elektroustanovok. (2017). Kyiv. Minenergovugillja Ukrai'ny, 617.

[2] Nikander, A.; Järventausta, P. (2017). Identification of High-Impedance Earth Faults in Neutral Isolated or Compensated MV Networks. IEEE Trans. Power Deliv., 32, 1187–1195. https://ieeexplore.ieee.org/document/7809183.

[3] Gana, N., Ab Aziz, N. F., Ali, Z., Hashim, H. and Yunus, B. (2017). 'A comprehensive review of fault location methods for distribution power system', Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci., 6, 1, 185–192. https://doi.org/10.11591/ijeecs.v6.i1.pp185-192.

[4] Karpov, Ju.O., Kacyv, S.Sh., Kuharchuk, V.V., Vedmic'kyj, Ju.G.; pid red. prof. Karpova, Ju.O. (2011). Teoretychni osnovy elektrotehniky. Ustaleni rezhymy linijnyh elektrychnyh kil iz zoseredzhenymy ta rozpodilenymy parametramy: pidruchnyk. Vinnycja: VNTU, 377.

[5] Spinul, L.Ju., Buryk, M.P., Lobodzyns'kyj, V.Ju., Bilec'kyj, O.O. (2022). Teoretychni osnovy elektrotehniky Chastyna 2: Navchal'nyj posibnyk [Elektronnyj resurs, KPI im. Igorja Sikors'kogo. – Elektronni tekstovi danni (1 fajl: 9 Mbajt). Kyiv: KPI im. Igorja Sikors'kogo, 167.

[6] Fan, Y., Guang, L., Yu, S., Yongduan, X., Hui, P., Bingyin, X. (2019). Electrical Characteristics of Medium-voltage Distribution Network with Single-phase-to-ground Fault After Arc Extinction. Autom. Electr. Power Syst., 43, 134. https://doi.org/10.7500/AEPS20180911007.

[7] Farughian, A., Kumpulainen, L. and Kauhaniemi, K. (2018). 'Review of methodologies for earth fault indication and location in compensated and unearthed MV distribution networks', Electr. Power Syst. Res., 154, 373–380. , https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.09.006.

[8] Willheim, R., Waters, M. (1956). "Neutral Grounding in High Voltage Transmission". Elsevier publishing company, New York.

[9] Petteri Kangasluoma. (2019). Medium Voltage Network Residual Earth Fault Current Estimation Methods / Master of Science Thesis. Tampere University. Master's Degree Programme in Electrical Engineering. November, 97. https://urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-201911155985.

[10] Abbas, A. K., Hamad, S. and Hamad, N. A. (2021). 'Single line to ground fault detection and location in medium voltage distribution system network based on neural network', 23, 2, 621–632. https://doi.org/10.11591/ijeecs.v23. i2.pp621-632.

[11] Altonen, J.; Wahlroos, A.; Vähäkuopus, S.; Oy, E. (2017). Application of multi-frequency admittance-based fault passage indication in practical compensated MV-network. CIRED 2017, 947–951. https://doi.org/10.1049/oap-cired.2017.0967.

[12] Farughian, A.; Kumpulainen, L.; Kauhaniemi, K.

(2019). Earth Fault Location Using Negative Sequence Currents. Energies, 12, 3759. https://doi.org/10.3390/en12193759.

[13] Gururajapathy, S. S., Mokhlis, H. and Illias, H. A. (2017). 'Fault location and detection techniques in power distribution systems with distributed generation: A review', Renew. Sustain. Energy Rev., 74, March, 949–958. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.021.

[14] Authafa, S. (2018). 'Short Circuit Faults Identification and Localization in IEEE 34 Nodes Distribution Feeder Based on the Theory of Wavelets', Iraqi J. Electr. Electron. Eng., 14, 1, 65–79. https://doi.org/10.37917/ijeee.14.1.7.

[15] Farughian, A, Kumpulainen, L, Kauhaniemi, K. (2020). Non-Directional Earth Fault Passage Indication in Isolated Neutral Distribution Networks. Energies., 13(18), 4732. https://doi.org/10.3390/en13184732.

[16] Stojanović, Z.N.; Djurić, M.B. (2013). An algorithm for directional earth-fault relay with no voltage inputs. Electr. Power Syst. Res., 96, 144–149. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2012. 11.004.

[17] Baù, M., Benato, R., Dambone Sessa, S., Poli, M. and Quaciari, C. (2016) 'Phase-to-ground fault location methods in unearthed sub-transmission networks: A review', AEIT 2016 - Int. Annu. Conf. Sustain. Dev. Mediterr. Area, Energy ICT Networks Futur., , https://doi.org/10.23919/AEIT.2016.7892761.

[18] Papai'ka, Ju.A., Lysenko, O.G., Rogoza, M.V., Tokar, L.O., Stepanenko, Ju.V. (2019). Vtraty energii' v elektroobladnanni pry nyz'kij jakosti naprugy. Visnyk KrNU imeni Myhajla Ostrograds'kogo, 1, 114, 9–13.

УДК 621.316.13 62-523

SUBSTANTIATION OF ENERGY EFFICIENCY OF AUTOMATED HEATING TECHNOLOGY AT HPS

OLISHEVSKYI 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; ORCID: 0000-0001-8573-3366

Purpose. *Justification of rational control parameters of heat pumps to ensure energy-efficient operation of hydroelectric power plants in heating mode. Development of an automated methodology for calculating rational parameters for a complex system of hydroelectric power station (HPS) operating in heating mode.*

Methodology. *Mathematical analysis and modeling.*

Findings. *The application of the heat pump to ensure the heating mode at the hydroelectric power station for the needs of heating and hot water supply of buildings is analytically substantiated, as well as the rational parameters of the heat pump, which ensure the efficient heating mode at the hydroelectric power station, are determined. It is impractical and inefficient to pass the full flow of water passing through the hydraulic unit through the heat pump, because in this case the energy consumption in the heat pump compressor is several times higher than the consumption of the hydraulic unit in pumping mode, which devalues the proposed measure as an energy-saving measure. Therefore, the limiting and rational values of the design and operating parameters of the heat pump and heat accumulator, which ensure the heating mode of operation of the HPS to meet the needs of hot water supply, were substantiated. According to the proposed technology, the operation of a hydro unit with a typical capacity of 120 MW in the heating mode for various energy consumptions for the electric drive of the heat pump compressor was investigated. In accordance with these costs, the values and ratios of the electricity and heat generation shares of the modernized HPS changed.*

The proposed unconventional technology for converting hydroelectric power plants to the heat generation mode allows for wide effective maneuvering in different proportions of electric and thermal generation, unlike CHP and other power plants. The technology under consideration allows for virtually no consumption of non-renewable energy resources, providing consumers with both electric and thermal energy.

Originality. *The technology of using a heat pump to transfer the operation of the hydroelectric power station to the heating mode (heating and hot water of residential buildings) is substantiated. An automated technique for determining the rational parameters of heat pump (HP) for the implementation of HPS heating technology has been developed. The developed automated technique allows to calculate the values of operational parameters of HP for the balance and arbitrary modes, which ensure the heating operation of the HPS to meet the current needs of heating and hot water supply.*

Practical value. *The use of a heat pump at a hydroelectric power station for heating and hot water supply allows you to save a third of conventional fuel consumption compared to a boiler unit.*

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

I.INTRODUTION

In today's difficult conditions, the energy system of Ukraine has significant problems with the shortage of all types of energy, namely: not only electric but also thermal, especially in the cold season. Of course, to overcome this crisis, it is necessary to restore the destroyed generation and networks, but this requires huge capital expenditures, which are in short supply at this difficult time.

Therefore, it is necessary to use various technical improvements and non-traditional measures regarding the existing energy equipment in order to increase the variability of the use of the existing generating capacities and the possibilities of effective transformation of thermal energy into electrical energy and vice versa.

Currently, the production of electricity and thermal energy is mainly carried out separately, respectively, at thermal and nuclear plants and in boiler houses.

However, thermal power plants (TPPs) have a relatively small maximum efficiency (about 42%) and the majority of heat is wasted in the environment, which is shown in the diagram of fig. 1. Therefore, combined heat and power plant (CHPP) are used to increase the degree of use of thermal energy. Combined production of electricity and thermal energy is carried out at the TPP. At the same time, the coefficient of thermal energy utilization almost doubles - up to 80% in TPP plants with condensing turbines, which is shown in the diagram in fig. 2. But in turn, the share of electricity production in the total energy balance of the station is significantly reduced compared to the combined heat and power plant (on average twice). Also, the principle of mutual parallel production of thermal and electrical energy causes a strong interdependence of these generations and imposes significant restrictions on maneuvering modes of production of these energies. In addition, thermal power plants, like thermal power plants, operate mainly on coal fuel, which also has difficulties in terms of quality and availability.

© Олішевський І.Г., 2024
DOI 10.15588/1607-6761-2024-2-4

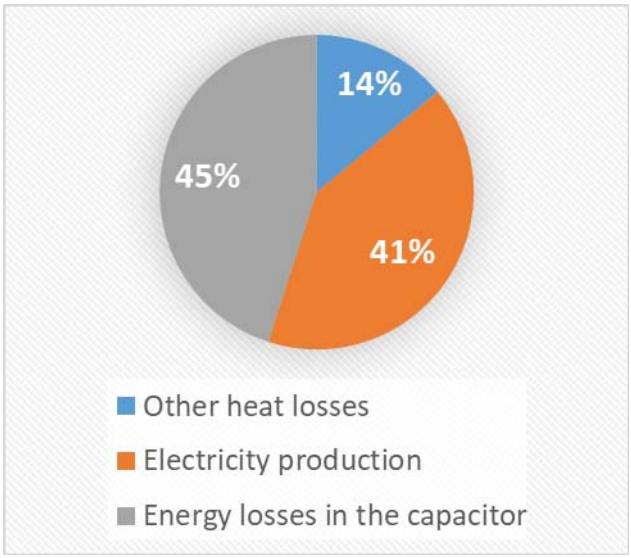


Figure 1. Components of the heat balance of the TPP

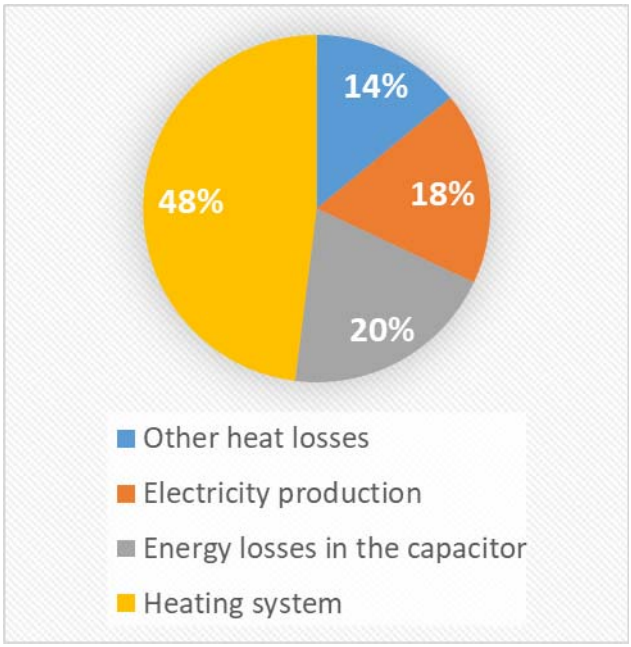


Figure 2. Components of the heat balance of the CHHP

Therefore, the idea of using a hydroelectric power station (HPS) in heating mode is relevant. To implement this unconventional technology, it was decided to use a heat pump. That is, during the operation of the hydroelectric power plant, the heat pump takes low-potential heat energy from the flow of water passing through the turbine and heats water for centralized heating and hot water supply systems.

II. ANALYSIS OF LAST RESEARCHES

In past studies, the author substantiated a number of innovative technologies for switching various power plants to heating mode. [1-5]. A heat pump was used in each variant. A universal automated method of calculating thermal processes was developed, with the use of heat pumps in the utilization of thermal emissions.

The main principle of the heat pump is that the device takes heat energy from various low-potential energy sources and transforms it into high-temperature heat energy, and only then transfers it to end users. Some energy is spent on the operation of the electric drive of the heat pump compressor.

Based on the results of research [1], conducted with the help of the calculation methodology developed by the authors, the possibility of using a heat pump in the thermal circuit of the TPP as a water heater in the hot water system is substantiated. It will allow the use of condensing power plants in the heating mode. The scheme is shown in fig.3.

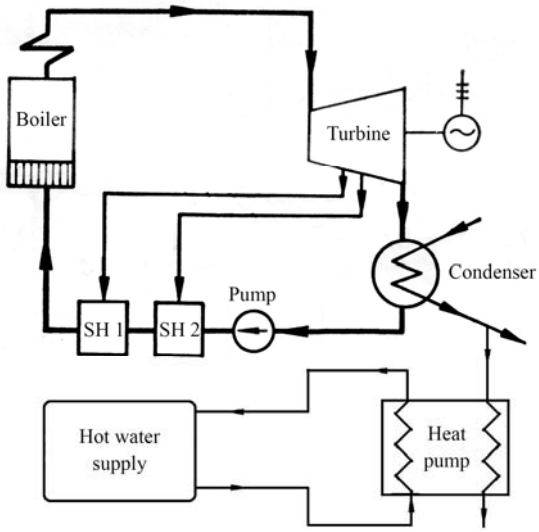


Figure 3. Scheme of application of the heating mode at the TPP (SH1, SH2 – steam heaters before the boiler)

The paper substantiates the rational mode of operation of the combined thermal power plant + heat pump system using the example of the power unit of the Kryvorizka thermal power plant with a condensing steam turbine of the K-300-240 KhTGZ type. According to the research results, the heat utilization factor for this system has acquired a rational value of 78%, and the energy conversion factor is 7.2, which corresponds to a high level of heat pump efficiency.

Heat pump and heat storage technology to transfer the functioning of the hydroaccumulating power plant (HSPP) to the heating mode of hot water supply of residential buildings was also substantiated. The scheme is shown in fig. 4. An automated method for determining the rational parameters of HP and HA for the implementation of HSPP heating technology was developed [2].

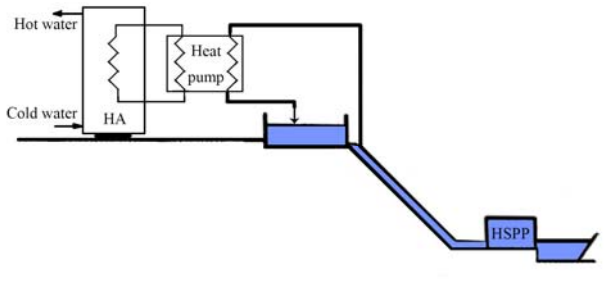


Figure 4. Scheme of application of the heating regime at the HAPP (HA – heat accumulator, HSPP - Hydro storage power plant)

It was determined that the use of a heat pump and a heat accumulator on the HSPP for the needs of hot water supply allows to save a third of conventional fuel consumption compared to a boiler unit.

However, passing the full flow of water passing through the hydraulic unit through the HP is impractical and inefficient, because then the energy consumption in the HP 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.

Therefore, the limiting and rational values of the design and mode parameters of HP and HA, which ensure the heating mode of operation of the HSPP to meet the needs of hot water supply, were substantiated.

That is, the use of HP requires conscientious research and justification in each case of the use of non-traditional technologies. In addition, such a scheme has significant limitations in maneuvering power ratios of electric and thermal generation.

Therefore, from the point of view of energy saving and providing consumers with electrical and thermal energy in a given ratio, an actual idea was proposed to substantiate the implementation of the heating mode of operation of the HPS for the needs of heating and hot water supply.

In works [3-5], the possibilities of using heat pump equipment for the use of heat from powerful units of industrial and domestic purposes for hot water supply and heating of premises were investigated. The use of heat accumulators showed a significant increase in efficiency from the use of the proposed technologies.

In works [6], are considered the main theoretical propositions on which the calculations in the study are based.

The work [7] substantiates the efficiency criteria by which the energy efficiency of heat pumps can be assessed. This is the energy conversion factor, which is equal to the ratio of the energy that reached the consumer to the energy that was used to implement the cycle. And the actual conversion factor, which takes into account the correction for the energy efficiency coefficient of the heat pump, which takes into account all energy consumption in the heat pump. The value of the energy efficiency of modern heat pumps is in the range of 0.65-0.7.

Sources [8, 20] reveal the issue of building a simulation model and methods of economic analysis of the obtained results.

Article [9] presents the results of experimental experiments on the implementation of a water heater with a heat pump, which uses low-pressure steam in a power plant condenser as a source of thermal energy. The influence of water flow, as well as the temperature of the water entering the condenser on the performance of the heat pump, has been experimentally proven. The data obtained are very important for the design of such systems, both in mathematical and simulation modeling. When conducting real experiments, a value of energy conversion coefficient of 4.5 was obtained, as well as other parameters, which makes it possible to check the adequacy of the constructed simulation and mathematical models.

The study [10] analyzed the use of heat pump equipment among the urban population. The results showed that more than 40% of surveyed households use heat pumps to heat water. The decisive factors have been identified when deciding to install heat pump equipment, the main one of which is price. The characteristics of the equipment used in the presented urban sample were analyzed. We used these data to forecast the prospects for the widespread introduction of improved heat pump technologies in Ukraine.

Article [11] discusses the results of experiments on an improved installation for heat pump water heaters. The improvement lies in the presence of a phase transition in the heat pump, which ultimately allowed the heater to operate stably and for a long time. At the same time, the capacity of the thermal accumulator, required to accumulate the same amount of energy, decreases. The thermal accumulator for a system built on the new technology is 57% of the volume of the thermal accumulator using the old technology, with all the same energy characteristics. This promotes the introduction of such technologies for household consumers.

The main goal of work [12] was to develop a model of a compact heat pump for hot water supply, as well as to conduct experimental tests. The peculiarity is that this is an intelligent model with low computational requirements. In addition, manufacturers can apply this model to existing pumps using simple experimental calculations. The reservoir model uses experimental correlations to account for the complex mechanism of mixing water flows during its intake. The results of these studies are taken into account when constructing our mathematical models of heat pump systems.

Article [13] describes the results of studies of an experimental installation of a water heating system with a heat pump, with a cyclic heating mode. The factors influencing the stability and efficiency of the heat pump are analyzed. The data obtained in the work was also used by

us to assess the adequacy of the constructed models, and to carry out simulation and mathematical modeling.

In the article [14], the authors analyzed energy efficiency standards for heating, ventilation and air conditioning. The evolution of the development of these standards is considered, and recommendations are presented for further improvement of the criteria when introducing modern energy-saving heating, ventilation and air conditioning systems, even at the building design stage.

In works [17-18], we obtained basic methods for calculating the technological parameters of heat pumps and solar collectors, which can be used as modules in our technology.

In the study [19], using the example of the state of Korea, energy efficiency standards are analyzed. In the carbon-neutral era, energy efficiency goes beyond simply providing economic benefits through fuel savings, but is valued as the most effective means of responding to climate change.

Particularly important for our research was article [21], which proves the greatest energy efficiency of heat pumps with water as a source, compared to other heating equipment, including heat pumps with an air source of thermal energy. The relationship between the energy conversion coefficient and exergy efficiency with the temperature of water at the inlet and outlet of the evaporator and condenser is analyzed.

Based on the materials reviewed, we draw a conclusion about the feasibility of using turbocompressor heat pumps with a water source of thermal energy for use in technologies for extracting useful thermal energy for heating and hot water supply needs. Unlike the previously discussed technologies, our research will concern hydroelectric power as a source of thermal energy for the use of a heat pump.

III. FORMULATION OF THE WORK PURPOSE

Justification of rational parameters of HP to ensure efficient operation of HPS in heat-fixation mode. Development of an automated methodology for calculating rational parameters for a complex system of HPS operating in heating mode.

IV. EXPOUNDING THE MAIN MATERIAL AND RESULTS ANALYSIS

The technology of applying the heating mode of operation of hydroelectric power plants for the needs of heating and hot water supply (HWS) was studied. To implement this idea, it was decided to apply HP. That is, during the operation of the hydroelectric power plant, the heat pump takes low-potential heat energy from the flow of water passing through the turbine and heats water for centralized heating and hot water supply systems. The scheme is shown in fig. 5.

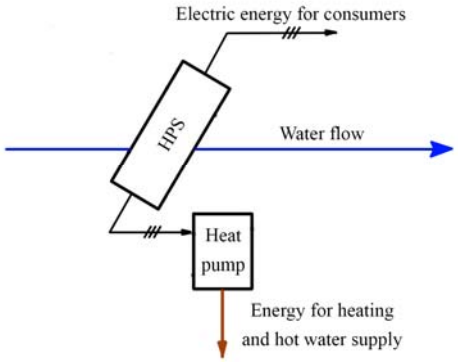


Figure 5. Scheme of application of the heating regime at the HPS

A steam compressor unit operating according to the main refrigeration cycle was presented as a HP. 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 refrigerant evaporation temperature of 2 °C were determined. A hydro unit with a typical capacity of 120 MW for the Zaporizhzhya HPS was accepted as the research object.

The water in the HP will be heated from 5 to 85 °C (as for the cold period). Accordingly, the refrigerant condensation temperature is set at 90 °C.

The automated method of calculating the parameters of the integrated HPS system operating in the heating mode has the following action algorithm:

1. Setting the power of the hydraulic unit, the geometric head of the station, the initial and final temperatures of the water that gives heat to theHP and water in the heating and HWS systems, physical parameters of water and refrigerant, technical parameters of the heat pump.

2. Formation of functions for changing the parameters of the refrigeration cycle from the thermal power of the heat pump condenser, and the formation of the refrigerant condensation temperature at constant evaporation temperatures, which is necessary for mathematical modeling of the operation of heat pumps.

3. Formation of the function of the dependence of the thermal power of HP and the function of the dependence of the electric power going to the electricity supply of consumers from the electric power of the HP compressor for a given refrigerant condensation temperature.

4. Determination of the balance power of the HP compressor and its corresponding HP parameters and the power supply of electricity consumers.

5. Formation of the function of the dependence of the electric power of the HP compressor and the function of the dependence of the electric power going to the electricity supply of consumers on the thermal power of the HP for a given refrigerant condensation temperature.

6. Determination of HP parameters and HPS electricity supply capacity for arbitrary values of compressor power or HP thermal power.

7. Analysis and comparison of the received parameters of the HP and the power supply system of the HPS and the choice of a more profitable heating mode of operation of the HPS.

According to this technology, the operation of a hydro unit with a typical capacity of 120 MW in the heating mode for various energy consumptions for the electric drive of the HP compressor was investigated. In accordance with these costs, the values and ratio of the electric and thermal generation shares of the improved HPS changed. Figure 6 shows the dependences of the electric, thermal and total generation capacities of the HPS on the HP compressor capacity for the refrigerant condensation temperature of 90 °C, i.e. for the maximum load on the system during the heating period.

The heat generation power function is calculated as follows

$$Q_m\left(N_к, t_к\right) = f\left\{N_к = \frac{l_к\left(t_к\right)\cdot M\left(Q_m\left(N_к, t_к\right), t_к\right)}{\eta_a \cdot \eta_м \cdot \eta_e}\right\} \qquad (1)$$

$N_к$ – electrical power of the HP drive, W; $t_к$ – refrigerant condensation temperature, °C; $l_к$ – theoretical specific work of the HP compressor, Дж/кг; M – mass flow of the refrigerant in the HP circuit, кг/с; η_a – adiabatic compressor efficiency; $\eta_м$ – mechanical efficiency of the compressor; η_e – compressor electric drive efficiency.

The function of power supply of electricity consumers

$$N_e\left(N_к\right) = N_{ген} - N_к \qquad (2)$$

$N_{ген}$ – nominal capacity of the hydropower unit.

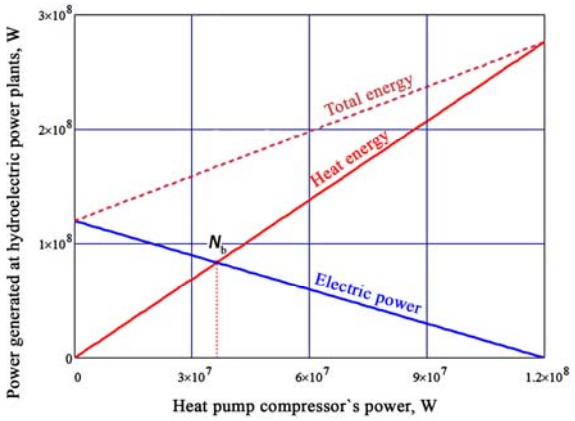


Figure 6. Determination of the balance power N_b of the heat pump compressor for a refrigerant condensation temperature of 90 °C

In turn, when the condensation temperature is reduced to 70 °C with average loads on the heating system, the efficiency of this system will essentially increase along with the conversion factor from 2.3 to 3.3.

Analyzing the graphs, it is possible to highlight such features of this technology as the ability to ensure the operation of the HPS in purely electric or purely thermal mode. Or it is enough to freely maneuver in different ratios of electricity and heat generation shares, which is impossible to achieve at a CHPP plant. At the same time, the mode of equal ratio of the shares of electric and thermal generation, which we called the balance regime, can cause significant interest. With the help of this technique, it is possible to determine the conditions for achieving this regime. Namely, it is about determining the appropriate value of the power of the HP compressor, which we also called the balance (N_b). It was noted that in this mode, about 30% of electricity is spent on heating needs, while ensuring an equal ratio of electric and thermal energy generation. In addition, the use of this technology allows you to save up to a third of conventional fuel for heating and hot water needs compared to a boiler with average loads on the heating system.

The balance value of the HP compressor power depending on the refrigerant condensation temperature

$$N_к^б\left(t_к\right) = f\left\{Q_m\left(N_к^б, t_к\right) = N_e\left(N_к^б\right)\right\} \qquad (3)$$

Figure 7 presents the calculated dependences of the electric power of the HP compressor and the electric power supplied to consumers from the thermal power of the HP for a refrigerant condensation temperature of 90 °C. According to these functions, it is quite convenient to perform calculations on the redistribution of shares of electric and thermal generation of HPPs depending on the current needs of thermal energy consumers.

Thus, the dependence of the electric power of the TN compressor on the thermal power of the TN and the condensation temperature of the refrigerant

$$N_к\left(Q_m, t_к\right) = \frac{l_к\left(t_к\right)\cdot M\left(Q_m, t_к\right)}{\eta_a \cdot \eta_м \cdot \eta_e} \qquad (4)$$

Q_m – thermal power of HP, W.

Then the dependence of the electric power that goes to the power supply of consumers on the thermal power of the HP and the condensation temperature of the refrigerant will be

$$N_e\left(Q_m, t_к\right) = N_{ген} - N_к\left(Q_m, t_к\right) \qquad (5)$$

In turn, the mass flow rate of the refrigerant in the HP circuit, depending on the thermal power of the HP and the condensation temperature of the refrigerant, will be

$$M\left(Q_m, t_к\right) = \frac{Q_m}{q_к\left(t_к\right)} \qquad (6)$$

$q_к$ – specific heat load of the condenser, J/kg.

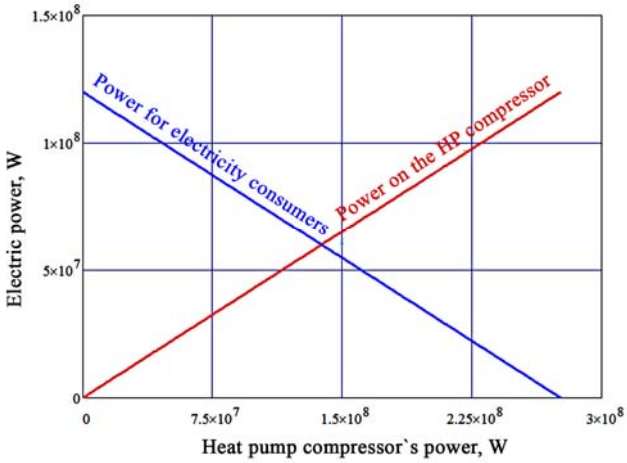


Figure 7. Dependence of the electric power generation capacity of the HPS on the thermal power of the HP for a refrigerant condensation temperature of 90 °C

The advantages include a sufficient number of low-potential energy sources, the close location of the hydroelectric power plant to large cities, relatively low costs for the operation of pumping equipment, and almost complete independence from fuel resources.

Difficulties in implementing this non-traditional technology include the need to design specialized high-power heat pump equipment.

V. CONCLUSION

The technology of using a heat pump to transfer the functioning of the hydroelectric power station to the heating mode (heating and hot water of residential buildings) is substantiated. An automated technique for determining the rational parameters of HP for the implementation of HPS heating technology has been developed. The following provisions were obtained.

1. The proposed non-traditional technology of switching the HPS to the heating mode allows for wide effective maneuvering in different ratios of electricity and heat generation shares, unlike CHPP and other power plants.

2. The use of a heat pump at a hydroelectric power station for heating and hot water supply allows you to save a third of conventional fuel consumption compared to a boiler unit.

3. The developed automated method allows to calculate the values of the operating parameters of HP for the balance and arbitrary modes, which ensure the heating operation of the HPS to meet the current needs of heating and hot water supply.

4. The considered technology allows not to waste non-renewable energy resources, providing consumers with electrical and thermal energy at the same time.

REFERENCE

[1] Olishevskyi I. H. (2015). Obgruntuvannja racional'noï shemi teplonasosnoï sistemi opalennj. *Mehanika giroskopichnih system.* NTUU «Kiïvs'kij politehnichnij institut», Kiïv, No 30, p. 26–35. https://doi.org/10.20535/0203-377130201573171

[2] Olishevskyi I.H. (2023). Automated methodology of calculating parameters for non-traditional technology of heating mode of hydro-storage power plant station. *Electrical Engineering and Power Engineering*, NU «Zaporiz'ka politexnika», Zaporizhzhya, No 1, p. 36-42. https://doi.org/10.15588/1607-6761-2023-1-4

[3] Olishevskyi I. H. (2021). Automated method of calculation of parameters for non-traditional heating technologies and conditioning of buildings. *Electrical Engineering and Power Engineering*, NU «Zaporiz'ka politexnika», Zaporizhzhya, No 3, p. 40-47. https://doi.org/10.15588/1607-6761-2021-3-4

[4] Olishevskyi I. H. (2017). Obgruntuvannja metodu utilizacii teploti sistemi kondicionuvannja dlja teplonasosnoï sistemi opalennja. *Informacijni sistemi, mehanika ta keruvannja.* NTUU «Kiïvs'kij politehnichnij institut», Kyiv, No 17, p. 86 – 94. DOI: http://dx.doi.org/10.20535/2219-3804172017102874

[5] Olishevskyi I. H. (2015). Obgruntuvannja zastosuvannja teplonasosnogo obladnannja dlja utilizacii teplovih vtrat v silovih transformatorah velikoï potuzhnosti. *Visnik Dnipropetrovs'kogo universitetu. Serija: Raketno-kosmichna tehnika*, Dnipr. nac. un-t im. O. Gonchara, Dnipropetrovs'k, No 4, Vol. 23. 18(1), p. 131-136. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vdurkt_2015_23_18(1)__22 URL: http://rocketspace.dp.ua/index.php/rst/issue/view/4

[6] Arsen'ev V.M., Melejchuk S.S. (2018). Teplovi nasosi: osnovi teorii i rozrahunku. SDU.

[7] Ostapenko, O. P., Leshhenko, V. V., & Tihonenko, R. O. (2014). Energetichna efektivnist' parokompresijnih teplovih nasosiv z elektrichnim ta kogeneracijnim privodami.

[8] High-temperature heat pump simulator (heatpack) for application in computer laboratory sessions for engineering students / A. Mota Babiloni et al. *Journal of Technology and Science Education*. 2021. Vol. 11, no. 1. P. 16. URL: https://doi.org/10.3926/jotse.952

[9] 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.

[10] 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.

[11] 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.

[12] Aguilar, F., Crespí-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] 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

[14] 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

[15] New Low-Temperature Central Heating System Integrated with Industrial Exhausted Heat Using Distributed Electric Compression Heat Pumps for Higher Energy Efficiency / F. Sun et al. *Energies*. 2020. Vol. 13, no. 24. P. 6582. URL: https://doi.org/10.3390/en13246582

[16] Park H., Kim M. S. Theoretical Limit on COP of a Heat Pump from a Sequential System. *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*. 2015. Vol. 23, no. 04. P. 1550029. URL: https://doi.org/10.1142/s2010132515500297

[17] Zheng G., Jing Y. Thermodynamics Performance Study on Water Source Heat Pump in Variant Operating Condition. *Energy & Environment*. 2009. Vol. 20, no. 4. P. 517–532. URL: https://doi.org/10.1260/095830509788707284

[18] An experimental study of solar thermal system with storage for domestic applications / M. Abid et al. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*. 2018. Vol. 12, no. 4. P. 4098–4116. URL: https://doi.org/10.15282/jmes.12.4.2018.09.0355

[19] 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

[20] Zhang H., Lao J. Economic Analysis of Two Heat Pumps to Recover Heat from Circulating Water. *E3S Web of Conferences*. 2022. Vol. 358. P. 01009. URL: https://doi.org/10.1051/e3sconf/202235801009

[21] Zheng G., Jing Y. Thermodynamics Performance Study on Water Source Heat Pump in Variant Operating Condition. *Energy & Environment*. 2009. Vol. 20, no. 4. P. 517–532. URL: https://doi.org/10.1260/095830509788707284

Стаття надійшла до редакції 01.03.2024

ОБГРУНТУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ОПАЛЕННЯ НА ГЕС

ОЛІШЕВСЬКИЙ І.Г. аспірант та асистент кафедри безпеки інформації та телекомунікацій, НТУ «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: olishevskiyih@gmail.com; ORCID: 0000-0001-8573-3366

Мета роботи. *Обґрунтування раціональних параметрів керування тепловими насосами для забезпечення енергоефективної роботи гідроелектростанцій в режимі опалення. Розробка автоматизованої методики розрахунку раціональних параметрів комплексної системи гідроелектростанції (ГЕС), що працює в режимі опалення.*

Методи дослідження. *Математичний аналіз та моделювання.*

Отриманні результати. *Аналітично обґрунтовано застосування теплового насосу для забезпечення теплофікаційного режиму на гідроелектростанції для потреб опалення та гарячого водопостачання будівель, а також визначені раціональні параметри теплового насосу, що забезпечують ефективний теплофікаційний режим на гідроелектростанції. Пропускати через тепловий насос повний потік води, що проходить через гідроагрегат, є недоцільним і неефективним, тому що в цьому випадку споживання енергії в компресорі теплового насоса в рази перевищує споживання гідроагрегату в насосному режимі, що знецінює запропонований захід як енергозберігаючий.*

Тому обґрунтовано граничні та раціональні значення конструктивних та робочих параметрів теплового насосу та теплового аккумулятора, що забезпечують опалювальний режим роботи ГЕС для задоволення потреб гарячого водопостачання. За запропонованою технологією досліджено роботу гідроагрегату типовою потужністю 120 МВт в режимі опалення за різних енерговитрат на електропривод теплового насоса-

компресора. Відповідно до цих витрат змінилися величини та співвідношення часток виробництва електроенергії та тепла модернізованої ГЕС.

Запропонована нетрадиційна технологія переводу ГЕС у теплофікаційний режим дозволяє здійснювати широке ефективне маневрування у різних співвідношеннях часток електричної та теплової генерацій на відміну від ТЕЦ та інших енергетичних установок.Розглянута технологія дозволяє практично не витрачати невідновлювані енергетичні ресурси, забезпечуючи споживачів одночасно електричною та тепловою енергією.

***Наукова новизна.** Обґрунтовано технологію використання теплового насоса для переведення роботи гідроелектростанції в теплофікаційний режим (опалення та гаряче водопостачання житлових будинків). Розроблено автоматизовану методику визначення раціональних параметрів теплового насоса (ТН) для забезпечення теплофікаційного режиме ГЕС. Розроблена автоматизована методика дозволяє обчислювати значення експлуатаційних параметрів ТН для балансового та довільних режимів, що забезпечують теплофікаційне функціонування ГЕС для задоволення поточних потреб опалення та гарячого водопостачання.*

***Практична цінність.** Застосування теплового насосу на ГЕС для потреб опалення та гарячого водопостачання дозволяє на третину зекономити витрати умовного палива у порівнянні з котельним агрегатом.*

Ключові слова: тепловий насос; тепловий акумулятор; автоматизація; енергозбереження; гідроелектростанція; теплова енергія; керування.

УДК 62-83:681.5

МЕХАТРОННА СИСТЕМА ДЛЯ ВИВЧЕННЯ ПРОЦЕСІВ КЕРУВАННЯ НА ПРИКЛАДІ МОДЕЛІ ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ ТИПУ «ПЛАНЕР»

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, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0784-7621;

КУЛИНИЧ Е.М. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електроприводу та автоматизації промислових установок Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: kuliniched@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4415-4362;

БЕРЕЖНИЙ О.Ю. студент групи Е-312-2 кафедри електроприводу та автоматизації промислових установок Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: 8357238@gmail.com

Мета роботи. *Розробка мехатронної системи на прикладі моделі літального апарата типу «Планер» для вивчення та дослідження процесів керування ним.*

Методи дослідження. *Фізичний експеримент на розробленому лабораторному стенді, комп'ютерне моделювання, розрахунково-аналітичний.*

Отримані результати. *В ході дослідження було розглянуто та проаналізовано основні процеси керування планером: взаємодію органів керування пілота та діючих механізмів крила. Проведено аналіз недоліків та переваг існуючих розробок за досліджуваною тематикою з урахуванням питань мобільності, економічності, простоти і надійності виконання, а також можливості використання в якості навчального стенду. Розроблено лабораторний стенд у вигляді мехатронної системи на прикладі моделі літального апарата типу «Планер» для вивчення та дослідження процесів взаємодії органів керування та виконавчих механізмів польоту. Підключення програмно-апаратного комплексу здійснюється за допомогою інтерфейсу USB. Для обробки команд процесору та конвертації їх у рухи елеронів використано SOC платформу з мікроконтролером ArduinoUno. В якості інтерфейсу керування обрано джойстик Logitech Extreme 3D. З метою підвищення подібності до реальних систем передбачено певну затримку (інерцію) між моментом впливу оператора на джойстик та реакцією планера. Як матеріал моделі планера використано пінополістирол. Сервоприводи MG-90S та DS-37 використовуються для керування положенням рухомих частин моделі планера. Обертання планера здійснюється за допомогою двигуна 28BYJ-48. Розроблено програмне забезпечення, особливістю якого є легке налаштування та швидкий запуск лабораторного стенду. Передбачити можливість ведення журналу, який дозволить проводити аналіз дій оператора стенду. В результаті проведеного дослідження було визначено особливості керування планером та структуру механізмів, що забезпечують процес керування.*

Наукова новизна. *Запропоновано та розроблено мехатронну систему моделі літального апарату типу «Планер» на основі програмно-апаратного комплексу на базі ArduinoUno, який відрізняється від існуючих наявністю програми, яка забезпечує легке налаштування та швидкий запуск літального апарату, що дозволяє досліджувати взаємодію органів керування та виконавчих механізмів польоту.*

Практична цінність*. Розроблений лабораторний стенд на основі літального апарату типу «Планер» розширює можливості вивчення та дослідження електромеханічних процесів систем автоматичного керування складними мехатронними об'єктами.*

Ключові слова: мехатронна система, літальний апарат, планер, система керування, лабораторний стенд, моделювання, Arduino, C++.

I. ВСТУП

На сьогодні авіація є однією з найбільш широкоохоплюючих галузей оскільки вона пов'язує бізнес та людей у всіх куточках світу. Темпи її використання невпинно зростають незважаючи на економічні та політичні коливання в світі. Тим паче слід зауважити що останнім часом отримав високий розвиток напрямок використання безпілотних або дистанційно керованих літальних апаратів. Розширення галузі викликає потребу у розробці та виробництві нових, а також модифікації існуючих літальних апаратів, щоб задовільнити зростаючий попит. Процес розробки літальних апаратів потребує висококваліфікованих кадрів, висуває високі вимоги до виробничих потужностей, вимагає чималого фінансування. Через ці фактори відносно дуже мала кількість країн має повний цикл виробництва літальних апаратів. Під час проектування нового та оновлення вже існуючого обладнання особливо ретельно досліджують можливості впровадження електронних систем через те, що вони здатні істотно розширити функціональні можливості літального

©Назарова О.С., Кулинич Е.М., Бережний О.Ю. 2024
DOI 10.15588/1607-6761-2024-2-5

апарату, підвищити зручність керування ним. Дослідження та розвиток авіоніки – це основа для розробки та виробництва сучасних, конкурентоспроможних літальних апаратів, які відповідатимуть актуальним функціональним вимогам. Однією зі складових авіоніки є задача забезпечення та поліпшення можливості керування літальним апаратом, а саме, підтримка зв'язку між органами керування, дієздатність та впровадження відмовостійкості усього функціоналу, який необхідний для здійснення керуванням.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛИКАЦІЙ

Мехатронна система літального апарату - це сукупність механічного та електричного обладнання, автоматики та програмної частини, яка забезпечує можливість виконувати польоти літака з високою надійністю та точністю. Система управління є комбінацію певної кількості пристроїв: датчиків, органів управління кабіною, приводів та програмно-обчислювальних складових тощо [1, 2]. Система управління польотом поділяється на дві підсистеми: первинну (кермо, елерони, стабілізатори) та вторинну відповідно. Вони забезпечують управління літальним апаратом під час польоту [3]. Розробка систем управління літальним апаратом відбувається дуже ретельно оскільки її надійність впливає безпосередньо на безвідмовну реакцію повітряного судна на дії пілотів. Керування літальним апаратом має певні специфічні особливості [4]. Зміна положення хоча б одного з основних елементів управління польоту (керма, стабілізатора або елеронів) впливає на розподіл тиску навколо крил та на напрям потоку набігаючого повітря. Це надає пілоту здатність управління у трьох осях оскільки впливає на повітряний опор і підйомну силу повітряного судна [5]. Правильність та ретельний прорахунок конструкції повітряного судна забезпечує легкість керування літаком під час маневрів і загальну стабільність у повітрі. Звісно що через певні конструкційні особливості є певні обмеження на діапазони відхилення для органів керування. Прикладом може виступати обмеження руху керма управління, щоб запобігти перенапруженню літака під час маневру [6]. У статті [7] досліджується надання безпілотним літальним апаратам планерного типу можливості автономної посадки. Якщо припустити, що літальний апарат оснащено будь-якою надійною системою вимірювання швидкості, такою як система глобального позиціонування або інерційний вимірювальний блок, може бути використана швидкість планера, щоб з високою точністю визначити його висоту під час посадки. Ця інформація стійка до різних умов зовнішнього освітлення та на різних типах текстурованої землі, що є важливою властивістю для контролю фази посадки літака. Забезпечення безпеки польоту дистанційно пілотованих авіаційних систем є складною проблемою через масовість такого роду об'єктів [8]. У документі [9] представлено комплексне проектування та метод перевірки літака та силової установки. Ідея полягає в тому, щоб перетворити модель системного рівня на стандартизовану архітектуру системи, яка містить структуру та обмеження. Таким чином, архітектура системи стає орієнтиром для проектування та перевірки на основі моделі літака. Ця робота [10] підкреслює переваги системного моделювання та симуляції для підтримки аналізу навантаження компонентів трансмісії (наприклад, приводів, моментних валів тощо) на етапі концептуального проектування. У статті [11] представлено метод моделювання, який об'єднує кілька ключових областей: динаміка польоту, керування польотом, керування двигуном, динаміка двигуна, вихлоп двигуна, шум літака, економія палива, планування польоту, що дозволяє дослідити відповідні показники ефективності.

Отже, ідея створення лабораторного стенду, який представляє собою мехатронну систему моделі літального апарату типу «Планер», для вивчення та дослідження процесів керування ним є актуальною, участь у розробці стенду студентів сприяє формуванню у них творчої складової, здатності аналізувати отримані результати, приймати рішення у нестандартних ситуаціях, що підвищує рівень їх теоретичної і практичної підготовки [12].

III. МЕТА РОБОТИ

Провести аналіз недоліків та переваг існуючих розробок за досліджуваною тематикою з урахуванням питань мобільності, економічності, простоти і надійності виконання, а також можливості використання в якості навчального стенду. Розробити лабораторний стенд у вигляді мехатронної системи на прикладі моделі літального апарата типу «Планер» для вивчення та дослідження процесів керування ним. В якості інтерфейсу підключення стенду використовувати USB. Передбачити можливість ведення журналу, який дозволить проводити аналіз дій оператора стенду.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ТА АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Розробка методу взаємодії користувачів з системою. При проектуванні програмно-апаратного комплексу (ПАК) враховано особливості застосування у навчальному процесі [13, 14].До параметрів, адаптованих під користувача-початківця відносяться низький час на розгортання системи у робоче становище, ймовірність малої обізнаності кінцевого користувача (студента) в програмуванні, відмовостійкість до раптового вимкнення електроживлення та некоректного з'єднання компонентів [15,16]. Зміна та модернізація налаштувань лабораторного стенду була заборонена для користувачів комплексу і можлива лише з залученням адміністратора комплексу (рис. 1, 2).

Розробка апаратної частини комплексу. Проведений аналіз складових модулів, з яких має складатись ПАК показав, що важливою частиною є мікроконтролерний модуль, що має забезпечувати зчитування даних з комп'ютеру, оброблювати його та формувати вихідний сигнал на безпосередньо модель планеру.

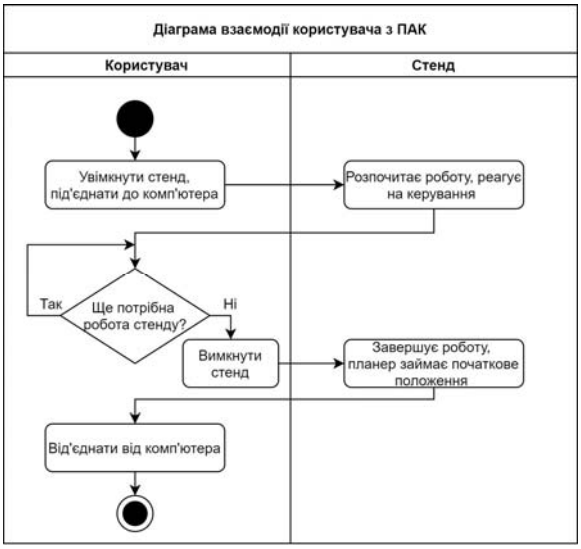


Рисунок 1. Діаграми діяльності користувача (студента) з ПАК

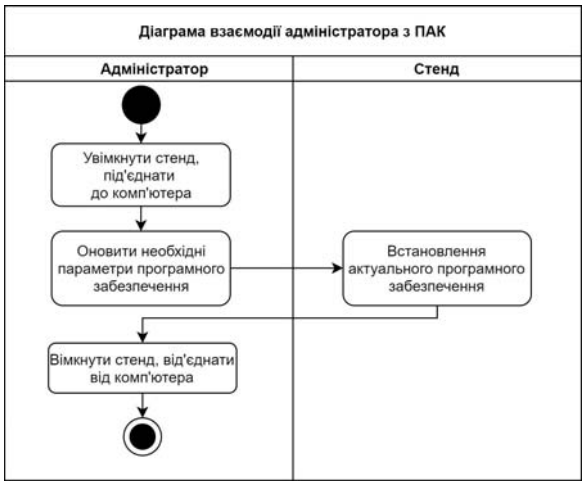


Рисунок 2. Діаграми діяльності адміністратора з ПАК

Розглянувши існуючі модульні рішення, а саме контролери на базі платформи Arduino було обрано саме Arduino UNO (рис. 3) оскільки вона має відносно високу обчислювальну потужність та помірні розміри [17]. З метою підвищення реалістичності керування було прийнято рішення використовувати в якості пристрою вводу джойстик Logitech Extreme 3D PRO. При обранні моделі ЛА важливим показником були характеристики матеріалу, з якого вона зроблена. Результатом аналізу стало визнання пінополістиролу найкращим варіантом в якості основного матеріалу для моделі. З метою забезпечення рухомості моделі ЛА інтегровано до стенду два сервоприводи (руля лівого та правого) MG-90S (рис. 4), кроковий двигун 28BYJ-48 (рис. 5) та драйвер ULN20 до нього.

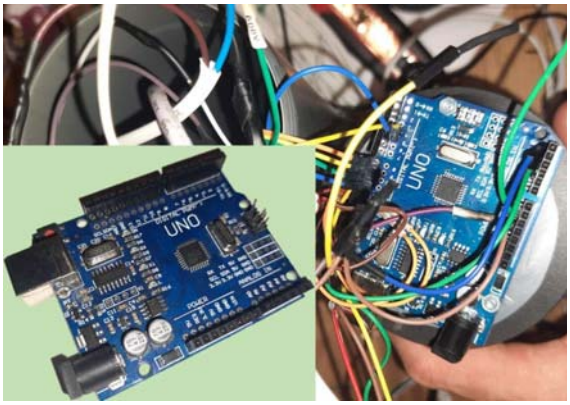


Рисунок 3. Arduino UNO та його інтеграція до стенду

Рисунок 4. MG-90S та його інтеграція до стенду

Для забезпечення наочної імітації роботи ЛА, а саме – для рухомості керма висоти, керма напряму та елеронів було використано кілька компактних сервоприводів DS-37. З огляду на обмеженість кількості інтерфейсів вводу плати Arduino було задіяно розширювач портів ШІМ PCA9685. Також використано блок живлення 12 В та перетворювач постійного струму LM2596. В результаті проектування з урахуванням обраних компонентів було розроблено архітектуру програмно-апаратного комплексу, що зображено на функціональній схемі (рис. 5). Алгоритм роботи лабораторного стенду роказано на рисунку 6.

Розробка програмної частини комплексу. При розробці програмного забезпечення було спроєктовано діаграму роботи ПАК та алгоритм роботи програмного забезпечення (рис. 7). Початком роботи комплексу є ініціалізація програмного забезпечення на контролері Arduino та комп'ютері. Після чого ПК налаштовує обмін даними з джойстиком та отримує його початкове положення. Зчитані дані комп'ютер нормує та надсилає на контролер Arduino на початку роботи комплексу.

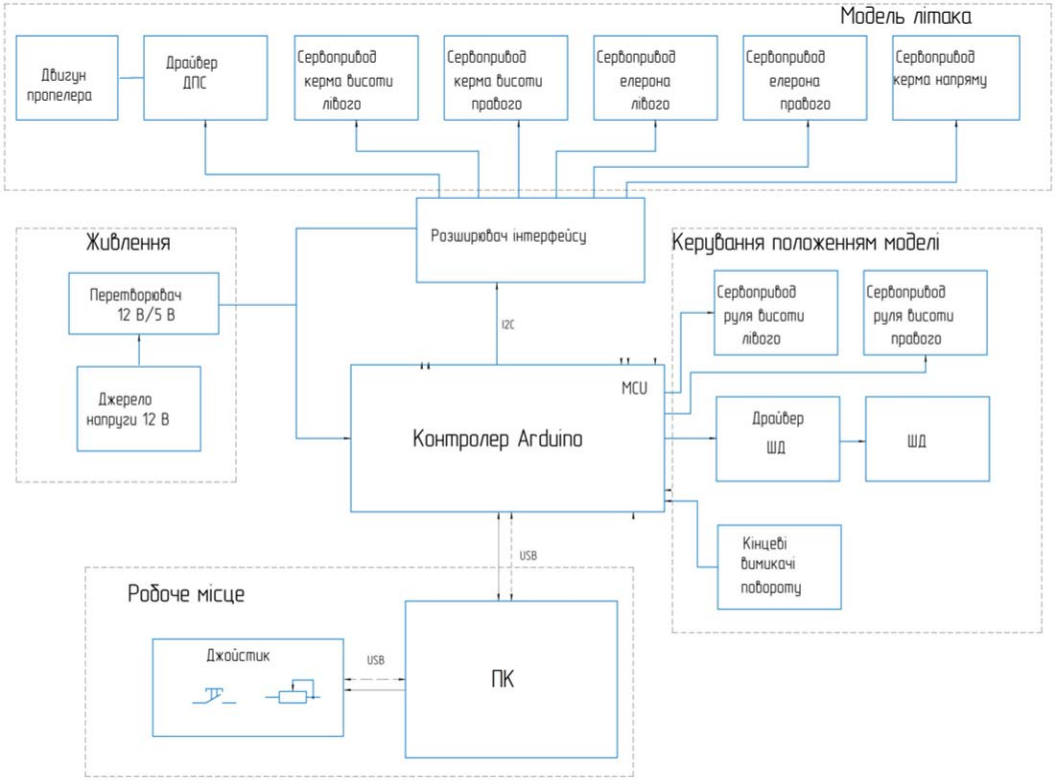


Рисунок 5. Функціональна схема програмно-апаратного комплексу

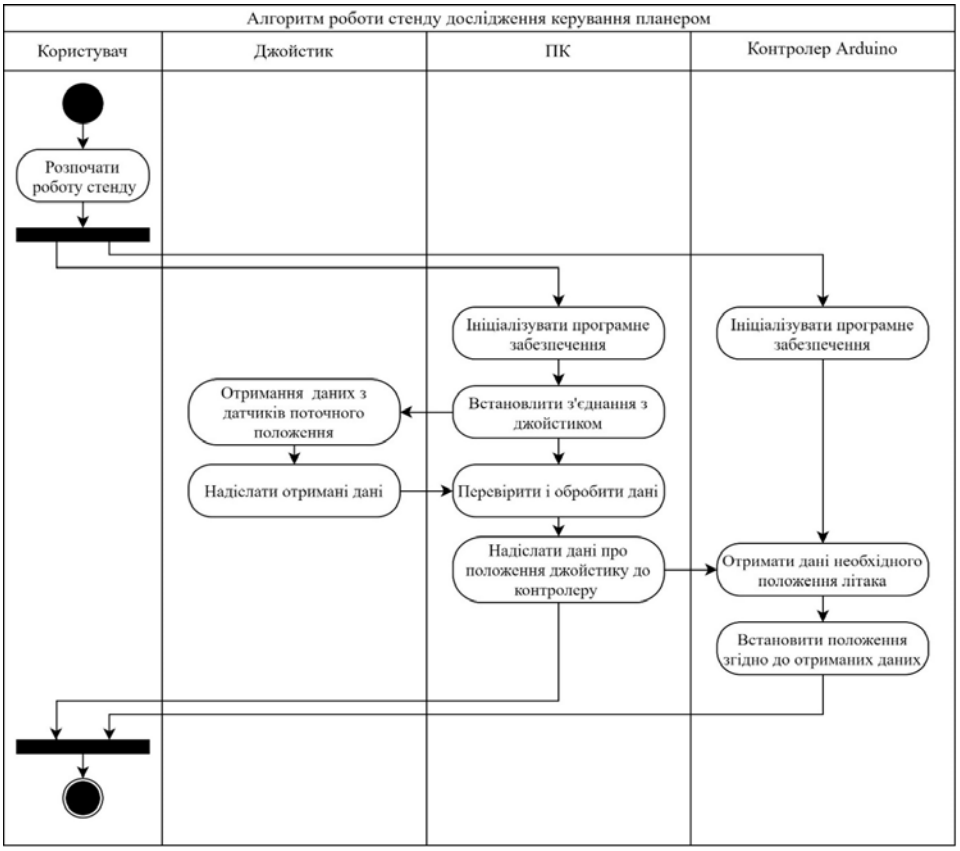


Рисунок 6. UML діаграма роботи ПАК

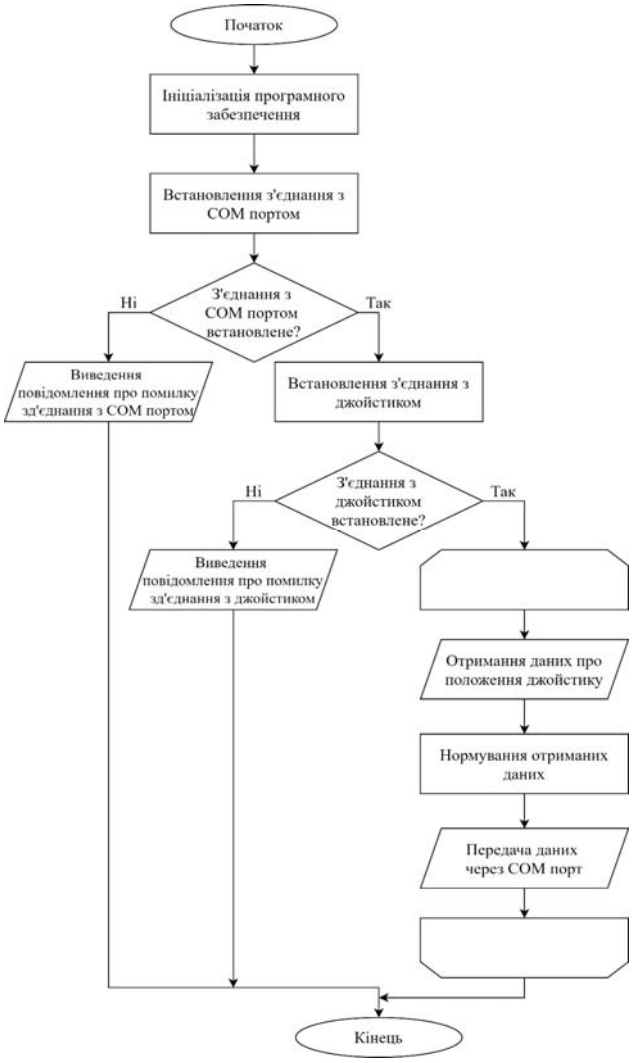


Рисунок 7. Алгоритм роботи програмного забезпечення комп'ютера у складі стенду

Рисунок 8. Фото лабораторного стенду

Контролер Arduino постійно перебуває в очікуванні даних щодо актуального положення джойстика у просторі. Після отримання даних він формує і надсилає відповідні команди до виконавчих механізмів (сервоприводів та крокового двигуна) для встановлення планеру у необхідне положення. Комунікація мікроконтролера з комп'ютером здійснюється за допомогою COM-порту – двонаправленого послідовного інтерфейсу обміну даних, передача в якому відбувається біт за бітом. Зазвичай його використовують для підключення пристроїв вводу на зразок миші та клавіатури, тому він може забезпечити доволі швидкий обмін даними. Фото моделі літального апарату типу «Планер» з мехатронною системою показано на рисунку 8. З метою підвищення подібності до реальних систем передбачено певну затримку (інерцію) між моментом впливу оператора на джойстик та реакцією планера.

V. ВИСНОВКИ

В результаті проведеного дослідження було визначено особливості керування планером та структуру механізмів, що забезпечують процес керування.

Розроблено програмно-апаратний комплекс у вигляді мехатронної системи на прикладі моделі літального апарата типу «Планер» для вивчення та дослідження процесів взаємодії органів керування та виконавчих механізмів польоту. Розроблено програмне забезпечення, особливістю якого є легке налаштування та швидкий запуск лабораторного стенду.

В подальшому планується удосконалення лабораторного стенду шляхом розширення апаратної частини для застосування в умовах нестабільного живлення мережі та відсутності персонального комп'ютеру; впровадження журналу використання стенду; впровадження інтерфейсу адміністратора підвищить зручність налаштування і використання системи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

[1] ICAO. Airplane upset prevention and recovery training aid [Electronic resource]. – Access mode: https://www.icao.int/safety/loci/AUPRTATablet/index.html.

[2] Nazarova, O. Mechatronic automatic control system of electropneumatic manipulator / V. Osadchyy, T. Hutsol, Sz. Glowacki, T. Nurek, V. Hulevskyi, I. Horetska // Scientific Reports, 2024. – Vol. 14. – P. 6970. https://doi.org/10.1038/s41598-024-56672-4.

[3] Nae, C. Military Aircraft Flight Control / C. Nae, I. Nicolin, and B. Adrian Nicolin // Aeronautics - New Advances. IntechOpen, Dec. 21, 2022. doi: 10.5772/intechopen.105491.

[4] IVAO. Introduction to flight controls [Electronic resource]. – Access mode: https://wiki.ivao.aero/en/home/training/documentation/ Introduction_to_flight_controls.

[5] U.S. Department of Transportation. Aviation Instructor's Handbook. [Electronic resource]. – Access mode: https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/ aviation_instructors_handbook/aviation_instructors_handbook.pdf.

[6] Kern, D. Introduction to Fly-by-Wire Flight Control

Systems: The professional pilot's guide to understanding modern aircraft controls / D. Kern // Paperback, 2021. – 52 p.
[7] Dupeyroux, J. M2APix: A Bio-Inspired Auto-Adaptive Visual Sensor for Robust Ground Height Estimation / J. Dupeyroux, V. Boutin, J. R. Serres, L. U. Perrinet and S. Viollet // 2018 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), Florence, Italy, 2018. - pp. 1-4. doi: 10.1109/ISCAS.2018.8351433.
[8] Żokowski, M. Autodiagnositcs for Remotely Piloted Aircraft Systems / M. Żokowski // 2020 International Conference Mechatronic Systems and Materials (MSM), Bialystok, Poland, 2020. - pp. 1-4. doi: 10.1109/MSM49833.2020.9201641.
[9] Wang, M. Integrated Design and Verification Method of Aircraft and Propulsion System / M. Wang, W. Gu, Z. Sun, Q. Zhang, J. Li // 2020 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), Beijing, China, 2020. - pp. 1343-1347. doi: 10.1109/ICMA49215.2020.9233787.
[10] Liu, T. System modeling and simulation for flap system power drive unit of commercial aircraft / T. Liu, Y. Zhang, Y. Qian, J. Ju, W. Yu // CSAA/IET International Conference on Aircraft Utility Systems (AUS 2020), Online Conference, 2020. - pp. 318-323. doi: 10.1049/icp.2021.0268.
[11] Wang, M. Integrated Aircraft and Propulsion System Simulation for Control and Performance Optimization / M. Wang, W. Gu, L. Wei, L. Belmon // 2019 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), Tianjin, China, 2019. - pp. 1150-1154. doi: 10.1109/ICMA.2019.8816590.
[12] Кулинич, Е.М. Лабораторний стенд з бездротовим інтерфейсом для дослідження електроприводу постійного струму / Е.М. Кулинич, О.С. Назарова, Д.В. Гончаров, С.Г. Чернишев, В.В. Піскун // Електроенергетика та електротехніка, 2020. - №3. – С.24-36. DOI: https://doi.org/10.15588/1607-6761-2020-3-3.
[13] Nazarova, O. S. Research of the microprocessor liquid level automatic control system / O. S. Nazarova, V. V. Osadchyy, B. Yu. Rudim // Applied Aspects of Information Technology, 2023. - Vol. 6. - No. 2. – pp. 163–174. DOI: https://doi.org/10.15276/aait.06.2023.12
[14] Nazarova, O. Software and Hardware Complex for The Study of Electropneumatic Mechatronic Systems / O. Nazarova, V. Osadchyy, S. Shulzhenko, M. Olieinikov // 2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES), Kremenchuk, Ukraine, 2022. - pp. 1-6. doi: 10.1109/MEES58014.2022.10005698.
[15] Sky Brary. Flight Controls, [Electronic resource]. – https://skybrary.aero/articles/flight-controls.
[16] Introduction to aircraft flight controls, [Electronic resource]. – https://www.flightliteracy.com/introduction-to-flight-controls.
[17] Arduino comparison. [Electronic resource]. – Access mode: https://diyi0t.com/technical-datasheet-microcontroller-comparison.

Стаття надійшла до редакції 14.05.2024

A MECHATRONIC SYSTEM FOR STUDYING CONTROL PROCESSES ON THE EXAMPLE OF A "GLIDE" TYPE AIRCRAFT MODEL

NAZAROVA O.S. Candidate of Technical Science, associate professor, associate professor of the Electric Drive and Commercial Plant Automation Department, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: nazarova16@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0784-7621;

KULYNYCH E.M. Candidate of Technical Science, associate professor, associate professor of the Electric Drive and Commercial Plant Automation Department, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: kuliniched@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4415-4362;

BEREZHNYI O.U. Student of the group E-312-2 of the Electric Drive and Commercial Plant Automation Department, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: 8357238@gmail.com

Purpose. *Development of a mechatronic system based on the example of a Glider type aircraft model for studying and researching its control processes.*

Methodology. *Physical experiment on the developed laboratory bench, computer modelling, calculation and analytical methods.*

Findings. *In the course of the study, the main processes of glider control were considered and analyzed: the interaction of the pilot's controls and the operating mechanisms of the wing. An analysis of the shortcomings and advantages of existing developments on the subject under study was carried out, taking into account the issues of mobility, economy, simplicity and reliability of implementation, as well as the possibility of using it as a training stand. A laboratory stand has been developed in the form of a mechatronic system based on the example of a "Glider" type aircraft model for studying and researching the interaction processes of control bodies and flight executive mechanisms. The*

software and hardware complex is connected using the USB interface. A SOC platform with an ArduinoUno microcontroller was used to process processor commands and convert them into aileron movements. The Logitech Extreme 3D joystick was chosen as the control interface. In order to increase the similarity to real systems, a certain delay (inertia) is provided between the moment of the operator's impact on the joystick and the response of the glider. Styrofoam was used as the material of the glider model. Servo drives MG-90S and DS-37 are used to control the position of the moving parts of the glider model. The airframe is rotated using a 28BYJ-48 engine. Software has been developed, the feature of which is easy setup and quick start-up of the laboratory stand. Provide for the possibility of keeping a log, which will allow analysis of the actions of the stand operator. As a result of the conducted research, the features of glider control and the structure of the mechanisms that ensure the control process were determined.

Originality. *A mechatronic system of a "Glider" type aircraft model based on an ArduinoUno-based software-hardware complex has been proposed and developed, which differs from the existing ones by the presence of a program that provides easy setup and quick start-up of the aircraft, which allows you to study the interaction of control bodies and executive mechanisms flight.*

Practical value. *The developed laboratory stand based on the "Glider" type aircraft expands the possibilities of studying and researching electromechanical processes of automatic control systems of complex mechatronic objects.*

Keywords: mechatronic system, aircraft, glider, control system, laboratory stand, modeling, Arduino, C++.

REFERENCES

[1] ICAO. Airplane upset prevention and recovery training aid [Electronic resource]. – Access mode: https://www.icao.int/safety/loci/AUPRTATablet/index.html.

[2] Nazarova, O., Osadchyy, V., Hutsol, T., Glowacki, Sz., Nurek, T., Hulevskyi, V., Horetska I. (2024). Mechatronic automatic control system of electropneumatic manipulator. *Scientific Reports*, 14, 6970. https://doi.org/10.1038/s41598-024-56672-4.

[3] Nae, C., Nicolin, I., Adrian, B. (2022). Nicolin Military Aircraft Flight Control. *Aeronautics - New Advances*. doi: 10.5772/intechopen.105491.

[4] IVAO. Introduction to flight controls [Electronic resource]. – Access mode: https://wiki.ivao.aero/en/home/training/documentation/ Introduction_to_flight_controls.

[5] U.S. Department of Transportation. Aviation Instructor's Handbook. [Electronic resource]. – Access mode: https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/aviation_instructors_handbook/aviation_instructors_handbook.pdf.

[6] Kern, D. (2021). Introduction to Fly-by-Wire Flight Control Systems: The professional pilot's guide to understanding aircraft controls. Paperback, 52.

[7] Dupeyroux, J., Boutin, V., Serres, J. R., Perrinet, L. U. & S. (2018). Viollet M2APix: A Bio-Inspired Auto-Adaptive Visual Sensor for Robust Ground Height Estimation. *2018 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, 1-4. doi: 10.1109/ISCAS.2018.8351433.

[8] Żokowski, M. (2020). Autodiagnositcs for Remotely Piloted Aircraft Systems. *International Conference Mechatronic Systems and Materials (MSM)*, 1-4. doi: 10.1109/MSM49833.2020.9201641.

[9] Wang, M., Gu, W., Sun, Z., Zhang, Q., Li, J. (2020). Integrated Design and Verification Method of Aircraft and Propulsion System. *2020 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, Beijing, China, 1343-1347. doi: 10.1109/ICMA49215.2020.9233787.

[10] Liu, T., Zhang, Y., Qian, Y., Ju, J., Yu, W. (2020). System modeling and simulation for flap system power drive unit of commercial aircraft. *CSAA/IET International Conference on Aircraft Utility Systems (AUS 2020)*, 318-323. doi: 10.1049/icp.2021.0268.

[11] Wang, M., Gu, W., Wei, L. (2019). Belmon Integrated Aircraft and Propulsion System Simulation for Control and Performance Optimization. *2019 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, 1150-1154. doi: 10.1109/ICMA.2019.8816590.

[12] Kulynych E., Nazarova, O., Goncharov, D., Chernyshev, S., & Piskun, V. (2020). Laboratory stand with wireless interface for investigation of automatic control systems of DC electric drives. *Electrical Engineering and Power Engineering*, (3), 24–36. https://doi.org/10.15588/1607-6761-2020-3-3 (in Ukrainian).

[13] Nazarova, O. S., Osadchyy, V. V., Rudim B. Yu. (2023). Research of the microprocessor liquid level automatic control system. Applied Aspects of Information Technology, 6, 2, 163–174. DOI: https://doi.org/10.15276/aait.06.2023.12

[14] Nazarova, O., Osadchyy, V., Shulzhenko, S., Olieinikov M. (2022). Software and Hardware Complex for The Study of Electropneumatic Mechatronic Systems. *IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*, 1-6. doi: 10.1109/MEES58014.2022.10005698.

[15] Sky Brary. Flight Controls, [Electronic resource]. – https://skybrary.aero/articles/flight-controls.

[16] Introduction to aircraft flight controls, [Electronic resource]. – https://www.flightliteracy.com/introduction-to-flight-controls.

[17] Arduino comparison. [Electronic resource]. – Access mode: https://diyi0t.com/technical-datasheet-microcontroller-comparison.