



*Науковий журнал*

# ЕЛЕКТРОТЕХНІКА та ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

№2'2021

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

*Виходить 4 рази на рік*

Запоріжжя

2021

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

ЗАКОРДОННІ ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ  
КОЛЕГІЇ

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

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

ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ (Україна)

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

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

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

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

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

Комп'ютерна верстка Дяченко О.О. Редактор англійських текстів Войтенко С.В. Журнал підписано до друку 15.06.2021 за рекомендацією вченої ради національного університету "Запорізька політехніка" (протокол №11/21 від 31.05.2021 р.). Формат 60x84/8. Ум. Др. Арк. 8,49. Тираж 300 прим. Зам. №461.

ZAPORIZHZHIA POLYTECHNIC NATIONAL UNIVERSITY

---



*Scientific journal*

# **ELECTRICAL ENGINEERING & POWER ENGINEERING**

## **№2'2021**

*Founded by Zaporizhzhia Polytechnic National University in May 1999*

*4 issues per year*

Zaporizhzhia

2021

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

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

FOREIGN MEMBERS OF EDITORIAL BOARD

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

MEMBERS OF EDITORIAL BOARD (Ukraine)

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

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

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

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

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

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

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

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

Computer layout Dyachenko O.O. Editor of English texts Voitenko S.V. The journal was signed on June 15, 2021 on the recommendation of the academic council of the Zaporizhzhia Polytechnic National University (Protocol No. 11/21 dated may 31, 2021). Sheet size 60x84/8. Cond. Print. Sheets 8,49. Number of copies printed 300. Rep. №461.

# ЗМІСТ

## I ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

*Бурдільна Є.В., Сергієнко С.А., Чорний О. П.*

Система векторного керування електроприводом конвеєра зернометальної машини.....8

*Муха А.М., Устименко Д.В., Аль Саїд Ахмад Мохаммад Діаб*

Теплові режими роботи сильнострумовеого контакту електротранспорту під час проведення стендових випробувань.....17

## II ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

*Тодоров О.В., Бялобржеський О.В., Рева І.В., Беззуб М.А*

Підсистема обробки вибірок даних активної та реактивної потужності трансформаторної підстанції.....25

*Папайка Ю.А., Луценко І.М., Кошеленко Є.В., Циган П.С.*

Методика вибору номінальної потужності силових трансформаторів в умовах розподільчих електричних мереж населених пунктів.....33

## III АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

*Колисниченко І.Ю., Ткачов В.В.*

Поліноміальна апроксимація динамічних сигналів одноплатформених ЖД ваг.....44

# CONTENTS

## I ELECTRICAL ENGINEERING

*Burdilna E.V., Serhiienko S.A., Chorny O.P.*

Vector control system of electric drive of grain machine conveyor.....8

*Mukha A.M., Ustymenko D.V., Mohammad Diab Al Said Ahmad*

Thermal modes of operation of power-current contact of electric transport during conduct of bench tests.....17

## II POWER ENGINEERING

*Todorov O.V., Bialobrzheskyi O.V., Reva I.V., Bezzub M.A.*

Data samples processing subsystem of a substation transformer active and reactive power.....25

*Papaika Yu. A., Lutsenko I.M., Koshelenko Ie.V., Tsyhan P.S.*

Methodology for selecting the rated parameters of power transformers in the town's electrical distribution networks in settlements.....33

## III AUTOMATION AND COMPUTER INTEGRATED TECHNOLOGIES

*Kolysnychenko I.Y., Tkachov V. V.*

Polynomial approximation of dynamic signals of single platform railway scales.....44

# СОДЕРЖАНИЕ

## I ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

*Бурдильная Е.В., Сергиенко С.А., Черный А.П.*

Система векторного управления электроприводом конвейера зернометальной машины .....8

*Муха А.Н., Устименко Д.В., Аль Саид Ахмад Мохаммад Диаб*

Тепловые режимы работы сильноточного контакта электротранспорта во время проведения стендовых испытаний.....17

## II ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

*Тодоров О.В., Бялобржеский О.В., Рева И.В., Беззуб М.А*

Подсистема обработки выборок данных активной и реактивной мощности трансформаторной подстанции.....25

*Папаика Ю.А., Луценко И.Н., Кошеленко Е.В., Цыган П.С.*

Методика выбора номинальной мощности силовых трансформаторов в условиях распределительных сетей населенных пунктов.....33

## III АВТОМАТИЗАЦИЯ И КОМПЬЮТЕРНО-ИНТЕГРИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

*Колисниченко И.Ю., Ткачев В.В.*

Полиномиальная аппроксимация динамических сигналов одноплатформенных ЖД весов.....44

## СИСТЕМА ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ КОНВЕЄРА ЗЕРНОМЕТАЛЬНОЇ МАШИНИ

- БУРДІЛЬНА Є.В.** старший викладач кафедри автоматизації та інформаційних систем Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна, e-mail: evburdilnaya@gmail.com;
- СЕРГІЄНКО С.А.** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри систем автоматичного управління та електроприводу Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна, e-mail: serhiy.serhiyenko@gmail.com;
- ЧОРНИЙ О. П.** д-р техн. наук, професор, професор кафедри систем автоматичного управління та електроприводу Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна, e-mail: ochornyi@ukr.net,

**Мета роботи.** Синтез системи автоматичного керування асинхронним електроприводом конвеєра зернометальника на базі перетворювача частоти з векторним керуванням.

**Методи дослідження.** Дослідження проводились із застосуванням методів математичного моделювання електроприводу; з використанням методів оптимізації налаштувань і синтезу регуляторів. В основі методики синтезу систем векторного керування лежить уявлення нестационарного багатозв'язаного об'єкта, яким є машина змінного струму, у вигляді деякої сукупності стаціонарних підоб'єктів з лінійними ланками в основних каналах регулювання.

**Отримані результати.** Проведено дослідження роботи системи підпорядкованого регулювання, що реалізує принципи векторного управління, орієнтованого по вектору потокозчеплення ротора. Виконано моделювання процесів збудження АД, пуску АД на холостому ході, накиди номінального навантаження, зниження швидкості. Встановлено, що синтезована система характеризується гарними якісними показниками. Перерегулювання при пуску не перевищує 5%, час регулювання становить 0,4 с, обмеження моменту здійснюється на заданому рівні. Доведено, що коливальні процеси в перехідних режимах із значними кидками моменту при класичних налаштуваннях контурних регуляторів можна компенсувати за рахунок введення штучних перехресних зв'язків в керуючу частину ЕП.

**Наукова новизна.** Реалізовано систему підпорядкованого регулювання АД конвеєра тримера зернометальника для завдання швидкості руху зернового потоку з метою можливості кидання зерна на задану відстань за рахунок створення відповідної балістичної траєкторії польоту, що забезпечує зниження збитків від пошкодження зерна.

**Практична цінність.** Запропонована структура системи векторного керування частотно-регульованого асинхронного електропривода з додатковими компенсуючими перехресними зв'язками між каналами регулювання активної й реактивної енергії для покращення якісних показників системи.

**Ключові слова:** зернометальні машини; електропривод конвеєра; векторне керування; регулювання швидкості; показники якості.

### І. ВСТУП

Післязбиральна обробка – один з найважливіших етапів при заготівлі зерна. Саме післязбиральною обробкою досягається той комплекс умов, який потрібен в конкретному випадку, адже для різних цілей умови можуть бути різними: зерно може бути фуражним, на помол в борошно, на насіння або для інших завдань. В агропромисловому комплексі важливе значення має вирішення питань, пов'язаних з підвищенням якості та зниженням витрат на післязбиральну обробку і зберігання зерна [1] – [2].

Аналізуючи схеми післязбиральної обробки зерна, що застосовується в даний час в більшості господарств, легко помітити, що найбільшу кількість операцій з післязбиральної обробки зернового вороху так

чи інакше пов'язане з його переміщенням, перелопачування або метанням, здійснюваних за допомогою спеціальних машин – зернокидачів. З попереднього аналізу найбільш поширених зернометальних машин на сучасних підприємствах та тих, що пропонують комерційні організації на ринках України, було обрано зернометальник ЗМ-60, 90 (рис. 1) [3] – [6].

На рис. 1 показано загальний вид зернокидача, з наступними позначеннями: 1 – рама з ходовою частиною; 2 – транспортер скребковий з двома живильниками; 3 – тример (метальник); 4 – електрообладнання; 5 – рамка поворотна; 6 – механізм самопересування.

Зернокидач може перекидати зерно на відстань до 14 метрів і забезпечує висоту складування до 5 метрів або завантаження зерна в транспортні засоби. Кидання зерна у транспортний засіб забезпечується



тримером. Тример являє собою конвеєр розміщений у напрямній трубі.

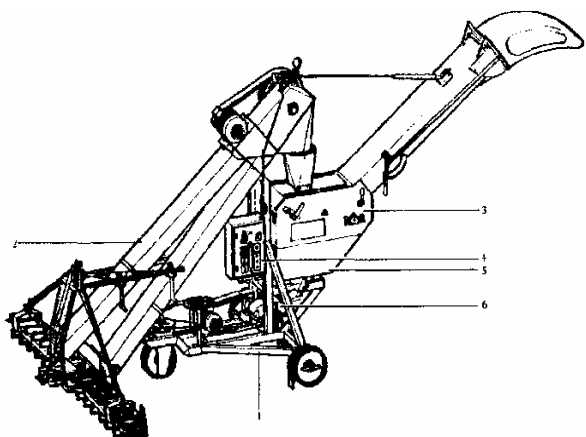


Рисунок 1. Загальний вид зернометальника

Можливість повороту тримера на  $180^\circ$  дає можливість забезпечувати безперервне навантаження зерна в транспортні засоби, формувати односторонній бурт після 2 проходів агрегату, рівномірно і тонким шаром розподіляти зерно на майданчику, швидко формувати зерно в бурти після просушування. Під час роботи скрепки зернокидача переміщують зерно до центру нижньої головки завантажувального транспортера, скрепки якого захоплюють його і подають в направляючий патрубок тримера. Переміщення зерна відбувається по конвеєрній стрічці, що розміщена у напрямній трубі. Спрямування руху потоку зерна здійснюється напрямним носиком, об який зерно вдаючись травмується та пошкоджується, що знижує його якість для подальшої переробки – з'являються сприятливі умови для розмноження мікроорганізмів, що вражають насіння і погіршують їх товарні та посівні якості.

Оскільки швидкість руху конвеєрної стрічки в існуючих моделях зернометальників є постійною, незалежно від відстані приземлення, зерно буде битися о носик з максимальною силою.

Очевидно, що зниження негативного впливу операцій післязбиральної обробки на зерно перспективніше всього домагатися модернізацією металевих машин чи принципів керування.

В [7] запропонована ідея кидання зерна на задану дальність за рахунок створення відповідної балістичної траєкторії польоту шляхом регулювання частоти обертання АД електроприводу конвеєра при живленні його від перетворювача частоти.

## II. МЕТА РОБОТИ

Синтез системи автоматичного керування асинхронним електроприводом конвеєра зернометальника на базі перетворювача частоти з векторним керуванням.

## III. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГУ МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Рівняння траєкторії руху потоку зерна має вигляд [8]:

$$h = L \operatorname{tg}(\alpha) - \frac{g}{2v_0^2 \cos^2(\alpha)} L^2,$$

де  $h, L$  – відповідно висота підйому і дальність польоту, м. З геометричних розмірів кут підйому напрямної труби тримера становить  $\alpha = 37,5^\circ$ .

Початкову швидкість польоту зерна знайдемо на підставі паспортних даних:

$$v_0 = \sqrt{\frac{Lg}{\sin(2\alpha)}} = \sqrt{\frac{14g}{\sin(2\alpha)}} = 11,9 \text{ м/с},$$

приймаючи, що така швидкість відповідає роботі АД при номінальній частоті й номінальній напрузі, розраховуємо залежності дальності при регулюванні частоти перетворювача.

З огляду на нелінійний характер залежності, визначено траєкторію польоту зерна залежно від різних значень частоти  $\nu$  (рис. 2).

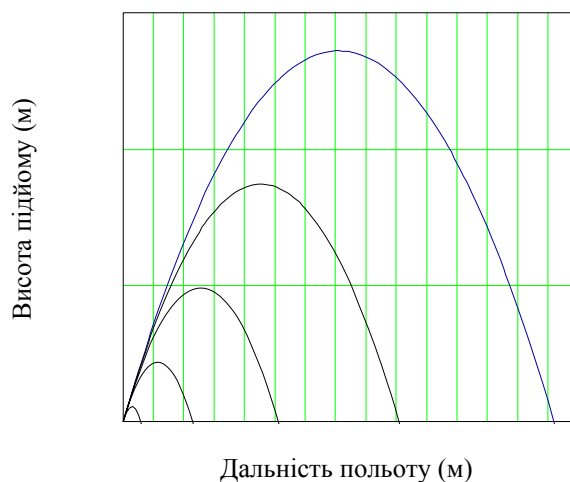


Рисунок 2. Траєкторії польоту зерна для ряду частот

Таким чином закон завдання на відносну частоту в залежності від відстані кидання зерна має вигляд:

$$L(\nu) = \frac{1}{g} \nu^2 \sin(2\alpha)$$

З вдосконаленням засобів регулювання і здешевленням перетворювальної техніки для механізмів з високими вимогами до динамічних і статичних характеристик намітилася тенденція до розширення сфери застосування електроприводів змінного струму на базі перетворювачів частоти з векторним керуванням [9] – [12].

В основі методики синтезу систем векторного керування лежить уявлення нестационарного багатозв'язаного об'єкта, яким є машина змінного струму, у вигляді деякої сукупності стаціонарних підоб'єктів з лінійними ланками в основних каналах регулювання [13] – [14].

Асинхронний двигун в осях координат, орієнтованих по вектору потокозчеплення ротора  $\vec{\Psi}_r$ , може бути представлений в ортогональній системі координат системою диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} \vec{U}_s = \vec{I}_s [R_s + (p + j\omega_k)L'_s] + (p + j\omega_k)K_r\vec{\Psi}_r, \\ \vec{U}_r = \vec{\Psi}_r \left[ \frac{K_r R_r}{L_m} + p + j(\omega_k - N\omega)L'_s \right] - K_r R_r \vec{I}_s, \end{cases} \quad (1)$$

де  $L'_s$  – перехідна індуктивність,  $K_r = \frac{L_m}{L_r}$ .

Розклавши рівняння (1) на дійсну і уявну частини і до визначивши їх рівняннями електромагнітного моменту і руху електроприводу, запишемо систему диференціальних рівнянь АД в координатах, орієнтованих по вектору потокозчеплення ротора:

$$\begin{cases} U_{su} - K_r U_{ru} = I_{su} R' (1 + T_l' p) - \omega_k L'_s I_{sv} - \frac{K_r}{T_r} \Psi_{ru}, \\ U_{sv} - K_r U_{rv} = I_{sv} R' (1 + T_l' p) + \omega_k L'_s I_{su} + K_r N \omega \Psi_{ru}, \\ \Psi_{ru} = \frac{T_r U_{ru} + L_m I_{su}}{1 + T_r p}, \\ \omega_k = \frac{U_{rv} + R_r K_r I_{sv} + N \omega}{\Psi_{ru}}, \\ M = \frac{3}{2} N K_r \Psi_{ru} I_{sv}, \\ J p \omega = M - M_c, \end{cases} \quad (2)$$

де  $R' = R_s + K_r^2 R_r$ ;  $T_l' = \frac{L'_s}{R}$ ;  $T_r = \frac{L_r}{R}$ .

Для АД з короткозамкненим ротором приймаємо  $U_r = 0$ .

Така структура характеризується найменшим числом перехресних зв'язків, які підлягають компенсації, і простотою реалізації. Відповідна структурна схема АД представлена на рис. 3.

Виділимо з системи рівнянь (2) дві підсистеми, кожна з яких окремо описує канали передачі активної і реактивної енергії. Ці підсистеми містять внутрішні перехресні зв'язки, вплив яких рівносильно прикладенню координатних збурень до якихось фіктивних об'єктів, описуваних цими, умовно виділеними, групами рівнянь. У багатозв'язних системах прямі канали можна розглядати незалежно один від одного, якщо дію перехресних зв'язків вважати зовнішніми збуреннями, компенсувати системою управління.

Для реалізації векторного управління необхідно формувати багатофазну систему напруг (струмів), що подаються на статор асинхронної машини. Для цих цілей в даний час переважно застосовування в системах векторного керування АД отримали транзисторні перетворювачі з широтно-імпульсною модуляцією або стеженням за заданими значеннями фазних струмів, в яких використовуються релейні слідкуючі системи, що працюють в змінному режимі [15] – [18]. Такі перетворювачі можуть бути описані аперіодичною ланкою з малою сталою часу  $T_n$  і коефіцієнтом посилення  $K_n$ .

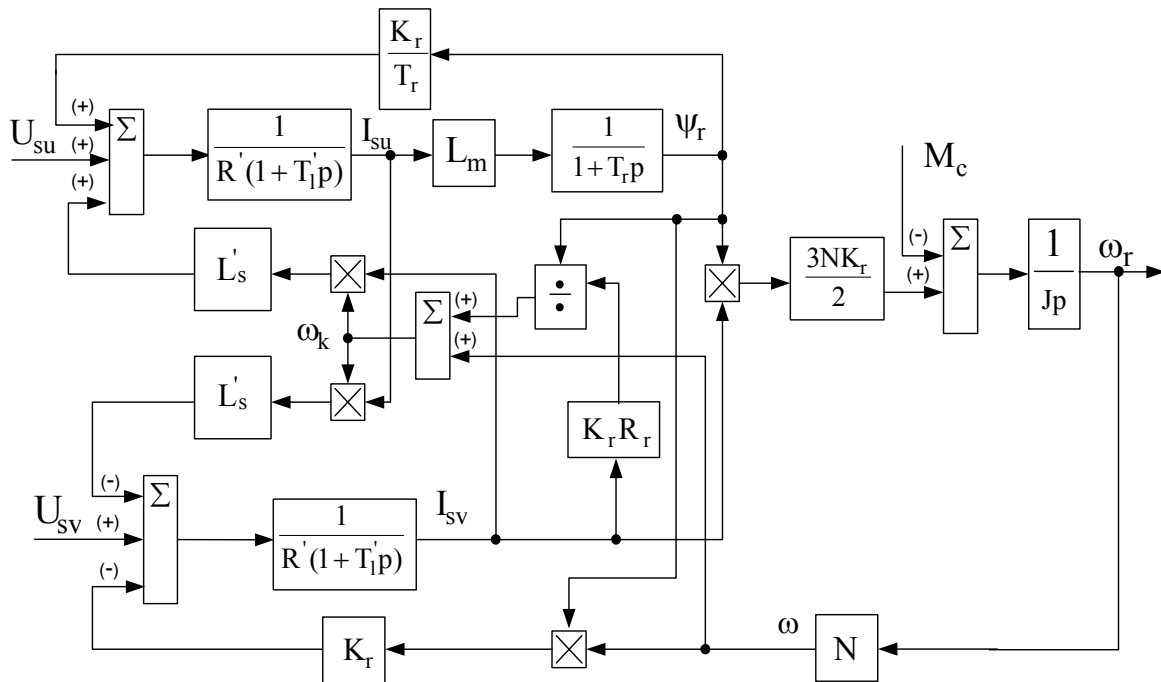


Рисунок 3. Структурна схема АД з короткозамкненим ротором в системі відліку, орієнтованої за вектором потокозчеплення ротора

З урахуванням вищесказаного перетворимо систему (2) до виду, вихідного для синтезу регуляторів. Доповнивши системи рівняннями перетворювача, отримаємо:

$$\begin{cases} p\Psi_{ru} = -\frac{\Psi_{ru}}{T_r} + \frac{L_m}{T_r} I_{su}, \\ pI_{su} = \frac{K_r}{T_r T_l' R'} \Psi_{ru} - \frac{I_{su}}{T_l'} + \frac{U_{su}}{R' T_l'}, \\ pU_{su} = -\frac{U_{su}}{T_n} + \frac{K_n}{T_n} u_y. \end{cases}$$

$$\begin{cases} p\omega = \frac{3NK_r}{2J} \Psi_{ru} I_{sv}, \\ pI_{sv} = -\frac{K_r \Psi_{ru}}{R' T_l'} \omega - \frac{I_{sv}}{T_l'} + \frac{U_{sv}}{R' T_l'}, \\ pU_{sv} = -\frac{U_{sv}}{T_n} + \frac{K_n}{T_n} u_y. \end{cases}$$

Зробимо розрахунок регуляторів і побудову системи підпорядкованого регулювання АД в осях координат орієнтованих по вектору потокозчеплення ротора.

Для контурів регулювання струмів і потокозчеплення використовується оптимізація по модулю. Контур швидкості налаштовується на симетричний оптимум.

ІІ регулятор реактивної складової струму статора має передавальну функцію:

$$W_{рег.с.р}(p) = \frac{T_l' R'}{2T_n K_n K_p} + \frac{R'}{2T_n K_n K_p p} \quad (3)$$

і забезпечує настройку внутрішнього контуру струму на модульний оптимум.

ІІ регулятор активної складової струму статора має таку ж передавальну функцію тільки з іншим коефіцієнтом зворотного зв'язку по струму.

$$W_{рег.с.а}(p) = \frac{T_l' R'}{2T_n K_n K_a} + \frac{R'}{2T_n K_n K_a p}, \quad (4)$$

де  $T_n$ ,  $K_n$  – стала часу і коефіцієнт підсилення перетворювача;

$K_p$ ,  $K_a$  – коефіцієнти зворотних зв'язків по реактивному і активному струмам відповідно.

Передавальна функція регулятора потокозчеплення буде:

$$W_{рег.пз}(p) = \frac{T_r K_p}{4T_n L_m K_\Psi} + \frac{K_p}{4T_n L_m K_\Psi p}, \quad (5)$$

де  $K_\Psi$  – коефіцієнт зворотного зв'язку за потокозчепленням.

Всі інші параметри відомі з вищесказаного.

Передавальна функція регулятора швидкості має вигляд:

$$W_{рег.ш}(p) = \frac{JK_a}{4T_n K K_{ш}} + \frac{JK_a}{32T_n^2 K K_{ш} p}, \quad (6)$$

де  $J$  – момент інерції;

$K_{ш}$  – коефіцієнт зворотного зв'язку за швидкістю;

$K = \frac{3}{2} NK_r \Psi_{r\text{ин}}$  – коефіцієнт пропорційності між

активною складовою струму статора і електромагнітним моментом при постійному потоці.

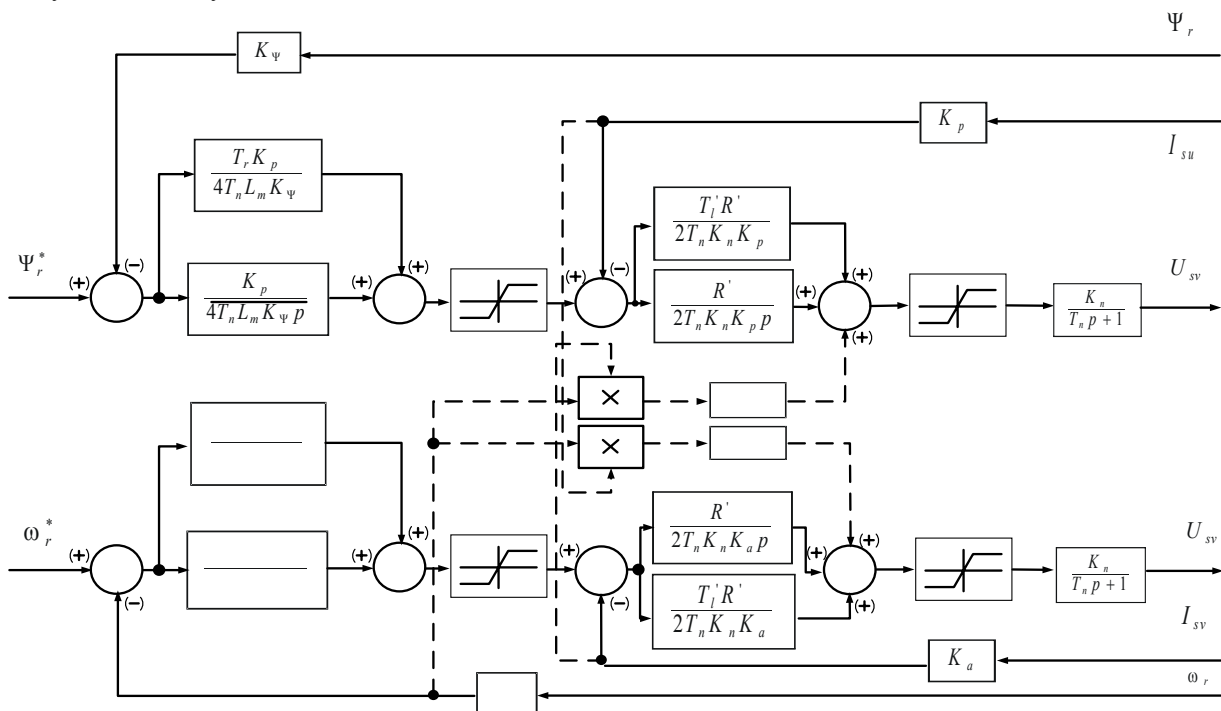


Рисунок 4. Структурна схема системи підпорядкованого регулювання

З рівнянь сталого режиму роботи АД знаходимо:

$$\Psi_{r_{\text{гун}}} \approx \frac{U_m}{\omega_0 \left( \frac{L'_s}{L_m} + K_r \right)},$$

$\omega_0$  – частота поля в зазорі машини,  $\omega_0 = 157 \text{ рад/с}$ ;

$U_m$  – амплітуда фазної напруги живлення.

У режимі ідеального холостого ходу стале значення реактивного струму статора визначимо як:

$$I_{r_{\text{гун}}} = \frac{\Psi_{r_{\text{гун}}}}{L_m}.$$

Знаходимо номінальний активний струм:

$$I_{svn} = \frac{2M_n}{3NK_r \Psi_{r_{\text{гун}}}}.$$

Розраховуємо коефіцієнти зворотних зв'язків за струмами, потокозчепленню і швидкості:

$$K_p = \frac{10}{2I_{svn}}; K_a = \frac{10}{2I_{svn}}; K_\psi = \frac{10}{\Psi_{r_{\text{гун}}}}; K_\omega = \frac{10N}{\omega_0}.$$

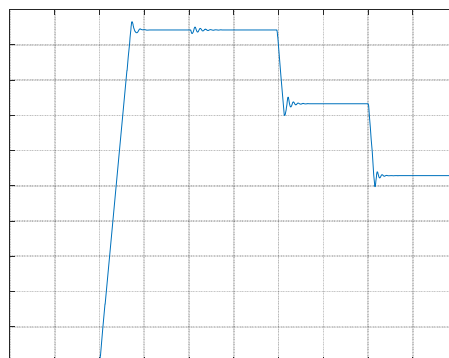
Структурна схема системи підпорядкованого регулювання, що реалізує принципи векторного управління, орієнтованого по вектору потокозчеплення ротора, приведена на рис. 4.

Дослідження якісних показників синтезованої системи з алгоритмами (3), (5) каналу управління потокозчепленням і (4), (6) каналу управління кутовою швидкістю ротора здійснювалося шляхом математичного моделювання для електроприводу з параметрами силової частини, наведеної в таблиці 1.

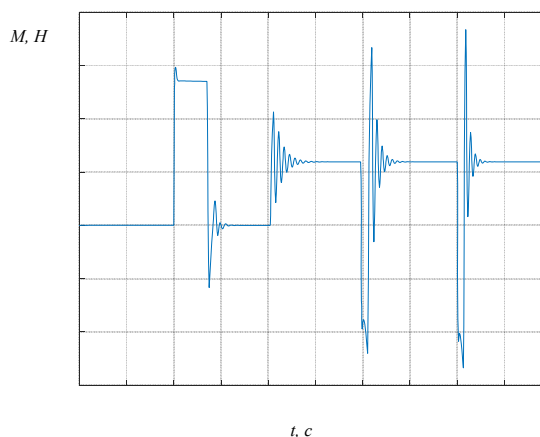
**Таблиця 1.** Параметри АД конвеєра тримера

Параметр	Позначення	Значення
Номінальна потужність, кВт	$P_n$	5,5
Номінальна напруга, В	$U_n$	380
Синхронна швидкість, об/хв	$n_0$	1000
Номінальне ковзання, %	$s_n$	5,5
Номінальний ККД, %	$\eta_n$	80
Номінальний коефіцієнт потужності	$\cos(\phi_n)$	0,86
Перевантажувальна здатність	$\lambda_m$	2,2
Кратність пускового моменту	$\lambda_n$	2
Кратність мінімального моменту	$\lambda_{\text{min}}$	1,6
Кратність пускового струму	$k_i$	6,5
Активний опір статора, Ом	$R_s$	0,067
Активний опір ротора, Ом	$R_r$	0,11
Індуктивний опір статора, в.о.	$X_s$	0,072
Індуктивний опір ротора, в.о.	$X_r$	0,11
Індуктивний опір контуру намагнічування, в.о.	$X_\mu$	0,138

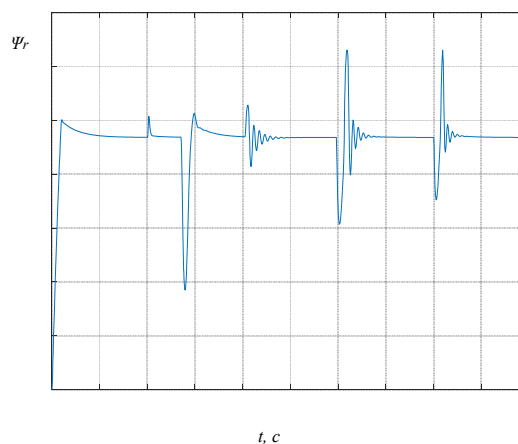
Моделювання проводилося для наступних процесів: збудження АД, пуск АД на холостому ході, накид номінального навантаження, зниження швидкості. Результати моделювання приведені на рис. 5–7.



**Рисунок 5.** Швидкість обертання ротора



**Рисунок 6.** Електромагнітний момент двигуна



**Рисунок 7.** Модуль потокозчеплення ротора

Як видно з графіків синтезована система володіє гарними якісними показниками. Перерегулювання при пуску не перевищує 5%, час регулювання становить 0,4 с, обмеження моменту здійснюється на заданому рівні. Однак в системі мають місце коливальні процеси в перехідних режимах із значними кидками моменту. Причому максимальна амплітуда моменту збільшується зі зменшенням швидкості. Це є наслідком впливу внутрішніх зворотних зв'язків.

Головними внутрішніми перехресними зв'язками є

$$\omega_k L'_s I_{sv}, \omega_k L'_s I_{su}, \omega_r N K_r \Psi_{r\text{ин}}$$

Вони зменшують запас стійкості системи при малих завданнях на швидкість і можуть привести до втрати стійкості в міру збільшення сигналу завдання на швидкість.

Перехресний зв'язок  $\omega_r N K_r \Psi_{r\text{ин}}$  при стабілізації потокозчеплення лінеаризується і його сигнал змінюється пропорційно швидкості двигуна, перетворюючись у зворотний зв'язок по ЕРС. При синтезі регуляторів швидкісного контуру нею нехтують аналогічно підходу, що застосовується в двигунах постійного струму.

Тому за допомогою штучних перехресних зв'язків, що вводяться в керуючу частину ЕП (пунктирні лінії на рис. 4), можна компенсувати дію природних перехресних зв'язків  $\omega_k L'_s I_{sv}$  та  $\omega_k L'_s I_{su}$  всередині об'єкта управління (АД). У такому випадку система стає стійкою, хоча сигнали компенсуючих зворотних зв'язків відхиляють настройки регуляторів від стандартних.

Коефіцієнти корегуючих зв'язків будуть такими:

$$K_{nua} = \frac{L'_s}{K_n K_u K_p}, K_{nup} = \frac{L'_s}{K_n K_u K_a}$$

Результати математичного моделювання такої системи наведено на рис. 8–10.

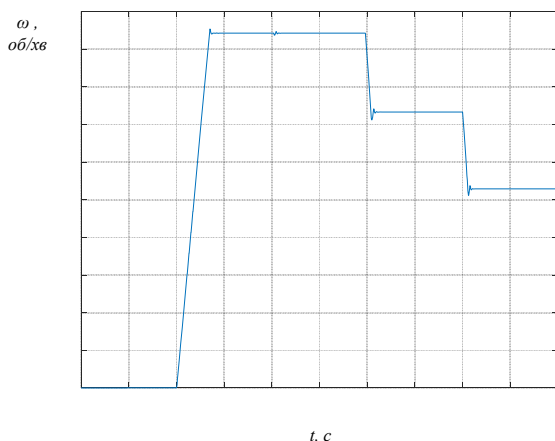


Рисунок 8. Швидкість обертання ротора

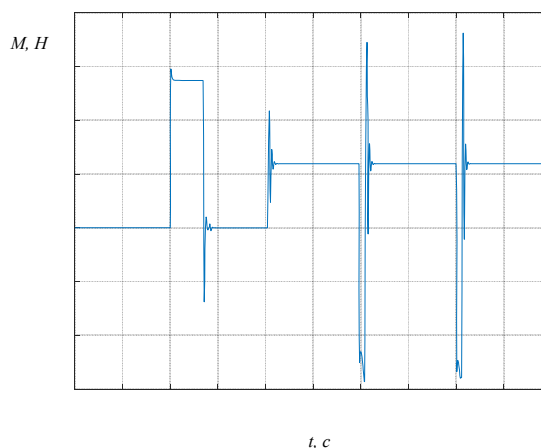


Рисунок 9. Електромагнітний момент двигуна

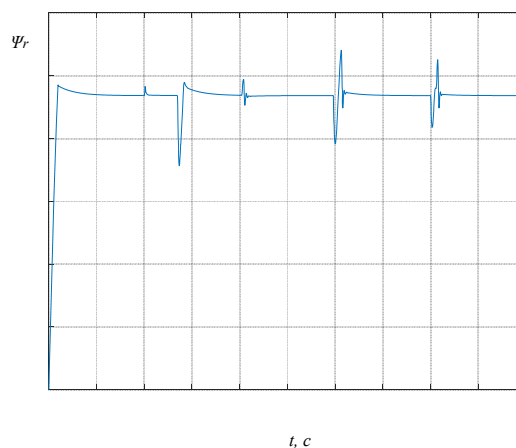


Рисунок 10. Модуль потокозчеплення ротора

#### IV. ВИСНОВКИ

Розрахунки дозволяють зробити висновок, що регулювання дальності закидання зерна можливо здійснювати зміною частоти напруги живлення на АД. При цьому пропорційно частоті знижується споживана потужність, що є більш ефективним способом регулювання ніж управління носиком напрямної труби тримера.

Використання системи векторного керування дозволяє отримати хороші регульовальні характеристики в широкому діапазоні регулювання швидкості, а модернізація систем підпорядкованого регулювання дозволяє при незначному ускладненні регуляторів (введення компенсуючих зворотних зв'язків) знизити коливальність перехідних процесів.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Urbaniak Z. Wplyw mechanicznych uszkodzen na zdolnosc kielkowania ziarna i wschody pszenicy i jeczmenia / Z. Urbaniak // Biul. Inst. Hodowli Aklimat. Rosl. – 2004. – Т. 161. – PP. 23–34.

- [2] Скринник І. Ю. Механічне травмування зерна / І.Ю. Скринник, І.О. Пісарькова, М.М. Петренко // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. – 2008. – Вип. 48. – С. 143–153.
- [3] Шуханов С.Н. Обзор конструкций зернометательных машин / С.Н. Шуханов, А.Л. Токмакова // Вестник ИрГСХА. – 2013. – № 59. – С. 111–115.
- [4] Гольяпин В.Я. Машины и оборудование для послеуборочной обработки зерна: каталог / В.Я. Гольяпин, Э.В. Жалнин, В.Ф. Федоренко. – М.: ФГНУ Росинформагротех, 2003. – 202 с.
- [5] Ханхасаев Г.Ф. Классификация зернометательных машин / Г.Ф. Ханхасаев, С.Н. Шуханов // Техника в сельском хозяйстве: науч.-теорет. журн. – 2010. – № 4. – С. 42–44. – ISSN 0131-7105
- [6] <https://bim-agritech.com/uk/zernometalnyky-ta-zernonavantazhuvachi>
- [7] Бурдільна Є.В. Підвищення ефективності транспортування і перевантаження зерна металевими машинами сільськогосподарської техніки / Є.В. Бурдільна, С.А. Сергієнко // Priority directions of science and technology development. Proceedings of X International Scientific and Practical Conference Kyiv, Ukraine, 13-15 June 2021. – 2021. – С. 206–212.
- [8] Бурдільна Є.В. Синтез закону керування електроприводом вентилятора зернокидача для фокусування зернового потоку / Є.В. Бурдільна, О.П. Чорний, В.К. Титюк, С.А. Сергієнко // World Science journal. – 2021. – № 5 (66). – С. 4–13. doi: 10.31435/rsglobal\_ws/30052021/7584
- [9] Bin Wu. Other Multilevel Voltage Source Inverters / Wu Bin, Narimani Mehdi. – Wiley-IEEE Press. – 2017. – PP. 185–223.
- [10] Bouchiker S. Vector control of a permanent-magnet synchronous motor using AC-AC matrix converter / S. Bouchiker, G.-A. Capolino, M. Poloujadoff // IEEE Transactions on Power Electronics. – 1998. – Vol. 13. – Iss. 6. – PP. 1089–1099. DOI: 10.1109/63.728336.
- [11] Kumar Yerraguntla Shasi. Medium-Voltage Vector Control Induction Motor Drive at Zero Frequency Using Modular Multilevel Converter / Yerraguntla Shasi Kumar, Gautam Poddar // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2018. – Vol. 65. – Iss. 1. – PP. 125–132. DOI: 10.1109/TIE.2017.2721927.
- [12] Vijayagopal M. Direct Predictive Current-Error Vector Control for a Direct Matrix Converter / M. Vijayagopal, C. Silva, L. Empringham, L. de Lillo // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2019. – Vol. 34. – Iss. 2. – PP. 1925–1935. DOI: 10.1109/TPEL.2018.2833495.
- [13] Слежановский О.В. Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями / О.В. Слежановский, Л.Х. Дацковский, И.С. Кузнецов и др. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 256 с.
- [14] Рудаков В.В. Асинхронные электроприводы с векторным управлением / В.В. Рудаков, И.М. Столяров, В.А. Даргау. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отделение, 1987. – 136 с.
- [15] Astrom K.J. Advanced PID control / K.J. Astrom, T. Hagglund // ISA – The Instrumentation, Systems, and Automation Society. – 2006. – 460 p.
- [16] Li Y. Patents, software, and hardware for PID control. An overview and analysis of the current art / Y. Li, K. Ang, G. Chong // Control Systems. – 2006. – Vol. 26. – PP. 41–54.
- [17] Vilanova R. Robust PI/PID controllers for load disturbance based on direct synthesis / R. Vilanova, O. Arrieta, P. Ponsa // ISA Transactions. – 2018. – Vol. 81. – PP. 177–196. DOI: 10.1016/j.isatra.2018.07.040.
- [18] Errouissi R. Experimental Validation of a Novel PI Speed Controller for AC Motor Drives With Improved Transient Performances / R. Errouissi, A. Al-Durra, S.M. Muyeen // IEEE Transactions on Control Systems Technology. – 2018. – Vol. 26. – Iss. 4. – PP. 1414–1421. DOI: 10.1109/TCST.2017.2707404.

Стаття надійшла до редакції 18.05.2021

## СИСТЕМА ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ КОНВЕЙЕРА ЗЕРНОМЕТАЛЬНОЙ МАШИНЫ

- БУРДИЛЬНАЯ Е.В.** старший преподаватель кафедры автоматизации и информационных систем Кременчугского национального университета имени Михаила Остроградского, Кременчуг, Украина, e-mail: [evburdilnaya@gmail.com](mailto:evburdilnaya@gmail.com);
- СЕРГИЕНКО С.А.** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры систем автоматического управления и электропривода Кременчугского национального университета имени Михаила Остроградского, Кременчуг, Украина, e-mail: [serhiy.serhiyenko@gmail.com](mailto:serhiy.serhiyenko@gmail.com);
- ЧЕРНЫЙ А.П.** д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры систем автоматического управления и электропривода Кременчугского национального университета

имени Михаила Остроградского, Кременчуг, Украина, e-mail: ochornyi@ukr.net,

**Цель работы.** Синтез системы автоматического управления асинхронным электроприводом конвейера зернометателя на базе преобразователя частоты с векторным управлением.

**Методы исследования.** Исследования проводились с применением методов математического моделирования электропривода; с использованием методов оптимизации настроек и синтеза регуляторов. В основе методики синтеза систем векторного управления лежит представление нестационарного многосвязного объекта, которым является машина переменного тока, в виде некоторой совокупности стационарных подобъектов с линейными звеньями в основных каналах регулирования.

**Полученные результаты.** Проведено исследование работы системы подчиненного регулирования, которая реализует принципы векторного управления, ориентированного по вектору потокосцепления ротора. Выполнено моделирование процессов возбуждения АД, пуска АД на холостом ходу, набросе номинальной нагрузки, снижения скорости. Установлено, что синтезированная система характеризуется хорошими качественными показателями. Перерегулирование при пуске не превышает 5%, время регулирования составляет 0,4 с, ограничение момента осуществляется на заданном уровне. Доказано, что колебательные процессы в переходных режимах со значительными бросками момента при классических настройках контурных регуляторов можно компенсировать за счет введения искусственных перекрестных связей в управляющую часть электропривода.

**Научна новизна.** Реализована система подчиненного регулирования АД конвейера триммера зернометателя для задания скорости движения зернового потока с целью возможности бросания зерна на заданное расстояние за счет создания соответствующей баллистической траектории полета, что обеспечивает снижение убытков от повреждения зерна.

**Практическая ценность.** Предложена структура системы векторного управления частотно-регулируемого асинхронного электропривода с дополнительными компенсирующими перекрестными связями между каналами регулирования активной и реактивной энергии для улучшения качественных показателей системы.

**Ключевые слова:** зернометальные машины; электропривод конвейера; векторное управление; регулирование скорости; показатели качества.

## VECTOR CONTROL SYSTEM OF ELECTRIC DRIVE OF GRAIN MACHINE CONVEYOR

BURDILNA E.V. Sen. Lect. of the Department of Automation and Information Systems of the Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University, Kremenchuk, Ukraine, e-mail: evburdilnaya@gmail.com;

SERHIYENKO S.A. Ph.D, Associate professor, Associate professor of the Department Systems of Automatic Control and Electric Drive of the Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University, Kremenchuk, Ukraine, e-mail: serhiy.serhiyenko@gmail.com;

CHORNYI O.P. Sci.D, Professor, Professor of the Department Systems of Automatic Control and Electric Drive of the Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University, Kremenchuk, Ukraine, e-mail: ochornyi@ukr.net,

**Purpose.** Synthesis of an automatic control system for an asynchronous electric drive of a grain thrower conveyor based on a frequency converter with vector control.

**Methodology.** The research was carried out using methods of mathematical modeling of an electric drive; using methods of tuning optimization and regulator synthesis. The technique of synthesis of vector control systems is based on the representation of a non-stationary multi-connected object, which is an AC machine, in the form of a set of stationary subobjects with linear links in the main control channels.

**Findings.** The study of the work of the subordinate regulation system, which implements the principles of vector control, oriented along the vector of the rotor flux linkage, was carried out. The modeling of the processes as AM excitation, AM start-up at idle speed, nominal load surge, speed reduction was performed. It was found that the synthesized system was characterized by good quality indicators. The overshoot at start does not exceed 5%, the regulation time is 0.4 s, the torque limitation is carried out at a predetermined level. It is proved that oscillatory processes in transient modes with significant torque surges with classical settings of loop regulators can be compensated by introducing artificial cross-links into the control part of the electric drive.

**Originality.** A system of subordinate regulation of the speed of the grain flow of the grain thrower trimmer conveyor was implemented to set the speed of the grain flow with the aim of throwing grain at a given distance by creating an appropriate ballistic flight trajectory, which ensures a reduction in losses from damage to grain.

**Practical value.** The structure of the vector control system of a frequency-controlled asynchronous electric drive with additional compensating cross-connections between active and reactive energy control channels is proposed to improve the quality indicators of the system.

**Keywords:** grain-throwing machines; conveyor electric drive; vector control; speed regulation; quality indicators.

## REFERENCES

- [1] Urbaniak, Z. (2004). Wplyw mechanicznych uszkodzen na zdolnosc kielkowania ziarna i wschody pszenicy i jeczmenia. *Biul. Inst. Hodowli Aklimat. Rosl.*, 161, 23–34. (in Polish).
- [2] Skrinnik, I.Yu., Pissar'kova, I.O., Petrenko, M.M. (2008). Mekhanichne travmuвання зерна [Mechanical injury of grain]. *Design, manufacture and operation of agricultural machinery*, 48, 143–153. (in Ukrainian).
- [3] Shuhanov, S.N., Tokmakova, A.L. (2013). Obzor konstruksiy zernometatel'nykh mashin [Overview of grain throwing machine designs]. *Bulletin of IrG-SKhA*, 59, 111–115. (in Russian).
- [4] Gol'tyapin, V.Ja., Zhalnin, Je.V., Fedorenko, V.F. (2003). Mashiny i oborudovanie dlya posleuborochnoy obrabotki zerna: katalog [Machines and equipment for post-harvest grain processing: catalog]. M.: FGUN Rosinformagroteh, 202. (in Russian).
- [5] Khankhasaev, G.F., Shukhanov, S.N. (2010). Klassifikatsiya zernometatel'nykh mashin [Grain throwing machine classification]. *Agricultural machinery*, 4, 42–44. (in Russian).
- [6] <https://bim-agritech.com/uk/zernometalnyky-ta-zernonavantazhuvachi>
- [7] Burdilna, E.V., Serhiienko, S.A. (2021). Pidvishchennya efektyvnosti transportuvannya i perevantazhennya zerna metal'nymi mashinami sil'skogospodars'koi tekhniki [Improving the efficiency of transportation and reloading of grain with metal machines of agricultural machinery]. *Priority directions of science and technology development. Proceedings of X International Scientific and Practical Conference Kyiv, Ukraine, 13-15 June 2021*, 206–212. (in Ukrainian).
- [8] Burdilna, E.V., Chornyi, O.P., Tytiuk, V.K., Serhiienko, S.A. (2021). Sintez zakonu keruvannya elektropivodom ventilyatora zernokidacha dlya fokusuвання zernovogo potoku [Synthesis of the law of control of the electric drive of the fan of the grain thrower for focusing of a grain stream]. *World Science journal*, 5, 66, 4–13. DOI: 10.31435/rsglobal\_ws/30052021/7584. (in Ukrainian).
- [9] Wu, B., Mehdi, N. (2017). *Other Multilevel Voltage Source Inverters*. Wiley-IEEE Press, 185–223.
- [10] Bouchiker, S., Capolino, G.-A., Poloujadoff, M. (1998). Vector control of a permanent-magnet synchronous motor using AC-AC matrix converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 13, 6, 1089–1099. DOI: 10.1109/63.728336.
- [11] Yerraguntla, Shasi Kumar, Gautam, Poddar (2018). Medium-Voltage Vector Control Induction Motor Drive at Zero Frequency Using Modular Multilevel Converter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65, 1, 125–132. DOI: 10.1109/TIE.2017.2721927.
- [12] Vijayagopal, M., Silva, C., Empringham, L., Lillo, L. (2019). Direct Predictive Current-Error Vector Control for a Direct Matrix Converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34, 2, 1925–1935. DOI: 10.1109/TPEL.2018.2833495.
- [13] Slezhanovskij, O.V., Dackovskij, L.H., Kuznetsov, I.S. et al. (1983). Sistemy podchinennogo regulirovaniya elektropivodov peremennogo toka s ventil'nymi preobrazovatelyami [Slave control systems for AC drives with valve converters]. M.: Energoatomizdat, 256. (in Russian).
- [14] Rudakov, V.V., Stolyarov, I.M., Dartau, V.A. (1987). Asinkhronnye elektropivody s vektornym upravlenim [Asynchronous electric drives with vector control]. L.: Energoatomizdat, 136. (in Russian).
- [15] Astrom, K.J., Hagglund, T. (2006). Advanced PID control. *ISA – The Instrumentation, Systems, and Automation Society*, 460.
- [16] Li Y., Ang, K., Chong, G. (2006). Patents, software, and hardware for PID control. An overview and analysis of the current art. *Control Systems*, 26, 41–54.
- [17] Vilanova, R., Arrieta, O., Ponsa, P. (2018). Robust PI/PID controllers for load disturbance based on direct synthesis. *ISA Transactions*, 81, 177–196. DOI: 10.1016/j.isatra.2018.07.040.
- [18] Errouissi, R., Al-Durra, A., Mueen, S.M. (2018). Experimental Validation of a Novel PI Speed Controller for AC Motor Drives With Improved Transient Performances. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 26, 4, 1414–1421. DOI: 10.1109/TCST.2017.2707404.



## ТЕПЛОВІ РЕЖИМИ РОБОТИ СИЛЬНОСТРУМОВОГО КОНТАКТУ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ ПІД ЧАС ПРОВЕДЕННЯ СТЕНДОВИХ ВИПРОБУВАНЬ

МУХА А.М.

д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри електротехніки та електромеханіки Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпро, Україна, e-mail: mukha.andrii@gmail.com;

УСТИМЕНКО Д.В.

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електротехніки та електромеханіки Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпро, Україна, e-mail: ustimenko.1979@gmail.com;

АЛЬ САИД АХМАД  
МОХАММАД ДИАБ

аспірант кафедри електротехніки та електромеханіки Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпро, Україна, e-mail: ahmadesraa20@gmail.com.

**Мета роботи.** Проведення аналізу результатів стендових випробувань ковзних електричних контактів електротранспорту, з метою визначення показників теплового режиму ковзного контакту.

**Методи дослідження.** Вихідні дані отримані під час натурних експериментів на спеціалізованому стенді в лабораторних умовах, які проводились з метою визначення зносу контактної провладки вставками різних типів для пантографів електрорухомого складу залізниць. Для визначення температури контактної провладки у місці ковзного контакту застосовувався неруйнівний безконтактний метод контролю за допомогою тепловізора.

**Отримані результати.** Під час проведення експериментальної частини досліджень були отримані тепловізорні фотографії, на яких зафіксовані температури у місці ковзного контакту між вставкою пантографа електрорухомого складу та контактним проводом, який встановлено на випробувальному диску. Ці температурні значення фіксувалися з визначеним часовим інтервалом, що дозволило побудувати залежності зміни теплового режиму у часі, визначити сталу часу нагрівання системи «вставка-контактний провід» випробувального стенду та отримати кінцеве значення температури наприкінці випробувань. Приймачі зразок вставки при якому отримана мінімальна температура у зоні ковзного контакту в якості еталонного, стає можливим за значенням температури контактної провладки у зоні ковзного контакту прогнозувати кінцевий результат випробувань інших типів накладок.

**Наукова новизна.** Показниками температурних режимів ковзного контакту електротранспорту під час стендових випробувань отримані вперше, запропонований відносний температурний показник дозволяє за результатами стендових випробувань прогнозувати якісні показники ковзного контакту електротранспорту.

**Практична цінність.** Стендові випробування вставок струмоприймачів електротранспорту є тривалою процедурою, нормативний показник кількості проходів струмоприймача на стенду дорівнює 500 тисяч проходів, що вимагає значних витрат часу, енергії, людських ресурсів та іні. Запропоновані за результатами випробувань показники, а саме стала (постійна) часу нагрівання та відносний температурний показник, дозволяють реалізувати двоетапні випробування. На першому етапі, тривалістю 10 тисяч обертів диску випробувального стенду визначаються запропоновані показники, та порівнюються з відповідними еталонними, у разі їх відповідності стає можливим прогнозувати кінцевий результат випробувань як успішний (знос контактної провладки менший за норму), або не успішний. В останньому випадку необхідність проведення другого етапу випробувань до 500 тис обертів стає під питанням, оскільки кінцевий результат буде негативним, а ресурси на випробування будуть задіяні значні, а тому ці випробування є недоцільними.

**Ключові слова:** вставка пантографа; ковзний сильнострумовий контакт; знос контактної провладки; температура контактної провладки; стендові випробування.

### I. ВСТУП

Система «пантограф – контактна мережа» своєю основною функцією має передачу електричної енергії електрорухомому складу. В рамках підвищення ефективності експлуатації електрифікованих залізниць потрібно удосконалювати існуючі та створювати нові пристрої і технології, які би забезпечили надійну і економну передачу електричної енергії електрорухомому

мому складу [1], [2], а це має на увазі зниження зносу контактної провладки і випадків його руйнування, підвищення ресурсу полозів струмоприймачів і зменшення витрат під час процесу струмознімання. Найбільш відповідальним і водночас вразливим вузлом даної системи є сильнострумовий ковзний контакт, який утворений контактним проводом та контактною вставкою пантографа. У разі впровадження нових типів вставок, проведення періодичних або інших

випробувань для існуючих типів вставок, здійснюється комплекс випробувань, серед яких є стендові випробування, метою яких є визначення значення зносу контактного проводу, після проходження певної кількості проходів диску випробувального стенду.

## II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Серед основних факторів зношування сильнотривалого ковзного контакту: окислення металічного елемента пари тертя; окислення композиційного елемента пари тертя і ослаблення його міцності; посилення адгезії внаслідок дисоціації плівок води чи органічних речовин під дією електричного струму; утворення ударних термічних напруг в динамічному контакті через нерівномірність розподілу густини струму в ньому; електричне іскріння; дугоутворення і т. д. [3]-[5]. Усі названі фактори можуть діяти одночасно але їх головною причиною є тепловиділення на перехідному контактному опорі. Тому такий фактор, як температура зони ковзного контакту може виступати деяким інтегральним показником, що досить точно відображає якість процесу струмознімання, а відповідно може використовуватись при вирішенні задач порівняння різних типів контактних вставок, а також прогнозування їх ресурсу та ресурсу контактного проводу [5].

Для перевірки відповідності контактних вставок пантографа вимогам стандарту ДСТУ ГОСТ 32680:2016 «Струмознімальні елементи контактні струмоприймачів електрорухомого складу. Загальні технічні умови» [6] проводять приймально-здавальні і типові випробування. До програми таких випробувань входять перевірки пробігу контактних вставок та зносу контактного проводу. Визначення пробігу контактних вставок до граничного зносу визначають за результатами експлуатаційних випробувань. Вставки вважаються такими, що витримали випробування повинні мати розрахунковий прогноз заміни по граничному зносу не менше ніж: для струмоприймачів легкого типу  $60 \cdot 10^3$  км і більше; для струмоприймачів важкого типу  $25 \cdot 10^3$  км і більше пункт 5.1.5 ДСТУ ГОСТ 32680:2016 [6]. Перевірку величини зносу контактного проводу проводять на стенді. Методика таких лабораторних випробувань висуває наступні вимоги до стенду: відрізок контактного проводу МФ-100 закріплюється в вигляді замкнутої кривої на обертовому пристрої, що забезпечує необхідну лінійну швидкість будь-якої точки проводу, а місця стику контактного проводу повинні забезпечувати плавне ковзання по ньому вставки. На стенді встановлюються, один напроти одного, два однакових фрагменти контактної вставки які притискаються в процесі до контактного проводу зусиллям  $(40 \pm 8)$  Н. Величину зносу контактного проводу вважають допустимою, якщо по завершенню 500 тис. обертів обертового пристрою вона не перевищує 2 мм (або 40 мкм на 10 тисяч обертів) пункт 8.3.13 ДСТУ ГОСТ 32680:2016 [6].

Галузева науково-дослідна лабораторія (ГНДЛ)

«Надійність і уніфікація електрообладнання рухомого складу» Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна обладнана стендом (рис.1) по визначенню величини зносу контактного проводу [7], що забезпечує виконання усіх вимог даного стандарту. Подібні стенди використовуються багатьма лабораторіями світу при вивченні властивостей не тільки ковзних контактів, а рознімних контактів, контактів електричних апаратів [3], [8], [9], в більшості випадків в їх складі є вимірювальна апаратура для контролю за температурою зони контакту. Під час проведення стендових випробувань авторами, з метою контролю температури зони ковзного контакту, використовувався тепловізор виробництва фірми Testo модель 875 з комплексом програмного забезпечення IrSoft. Вибір тепловізора в якості вимірювального засобу пояснюється можливістю дистанційно та безконтактно проводити заміри; високою термочутливістю; поєднанням фактичного і інфрачервоного зображень поверхні, що контролюється.



Рисунок 1. Стенд для проведення випробувань по визначенню зносу контактного проводу.

Дослідження [10], [11] демонструють результати математичного моделювання зносу контактних пар з урахуванням температури навколишнього середовища. Аналіз показує, що знос значною мірою визначається температурою тіл тертя, що впливає на твердість елементів контактної пари та фактичної площі контакту. Домінуюча роль електричної складової зносу в підвищенні температури пари тертя показана в [12].

## III. МЕТА РОБОТИ

Проведення аналізу результатів стендових випробувань ковзних електричних контактів електротранспорту, з метою встановлення взаємного зв'язку між показниками теплового режиму ковзного контакту та значенням зносу контактного проводу.

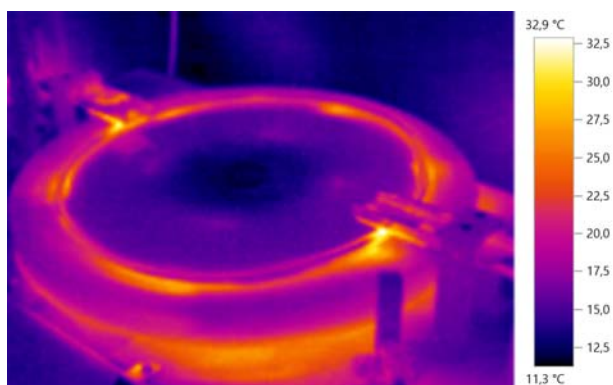
## IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ТА АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

В лабораторних умовах було досліджено більше 10 типів вставок пантографів, ідентифікувались вони

як «Зразок 1», «Зразок 2» і т.д. Під час випробування порівняльних випробувань здійснювався контроль за нагріванням контактного проводу та недопущення перевищення максимальної температури згідно ГОСТ 2584 (95°C) [14]. Виробники контактної проводу гарантують якісні показники контактної проводу у разі не перевищення вказаного значення у 95 °С. При перевищенні цього значення погіршуються фізико-механічні властивості контактної проводу, зокрема щільності робочої поверхні ковзного контакту, що може призвести до збільшення зносу контактної проводу, тому під час випробувань, при перевищенні цього значення випробування зразку вважались неуспішними.

Представимо результати проведених експериментів деяких зі зрізків. Перший етап випробувань «Зразків» складає 10 тис. обертів диску випробувального стенду, при цьому температура у зоні контакту фіксувалась кожну хвилину, це дало змогу отримати динаміку зміну температури у часі, від початкового значення до усталеного. Тривалість у часі першого етапу випробувань складала 50 хв.

Скриншот тепловізійної фотографії при випробуваннях «Зразка №1» представлено на рис.1.



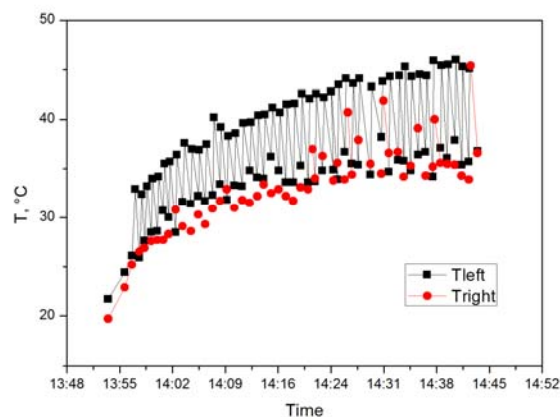
**Рисунок 1.** Скриншот тепловізійної фотографії при випробуваннях зразка №1.

При випробуваннях «Зразка 1» усталене значення температури системи «вставка-контактний провід» не перевищує значення 45 °С.

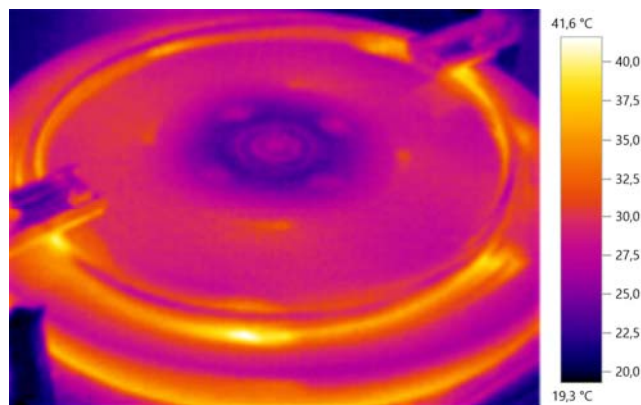
Скриншот тепловізійної фотографії при випробуваннях «Зразка №2» представлено на рис.3.

На рис.2 представлено графік зміни у часі температури нагрівання ковзного контакту при випробуваннях «Зразка 1». Окремо на графіку представлені графіки для лівого та правого тримача фрагменту вставки на стенді. Різниця нагрівання лівого та правого фрагментів вставки обумовлена конструктивними особливостями механізму тримача, що також було зафіксовано при випробуваннях інших зразків.

На рис.4 представлено графік зміни у часі температури нагрівання ковзного контакту при випробуваннях «Зразка 2».



**Рисунок 2.** Графік зміни у часі температури нагрівання ковзного контакту при випробуваннях зразка №1 при частоті обертання 205 об/хв та струмі 300 А.



**Рисунок 3.** Скриншот тепловізійної фотографії при випробуваннях зразка №2.

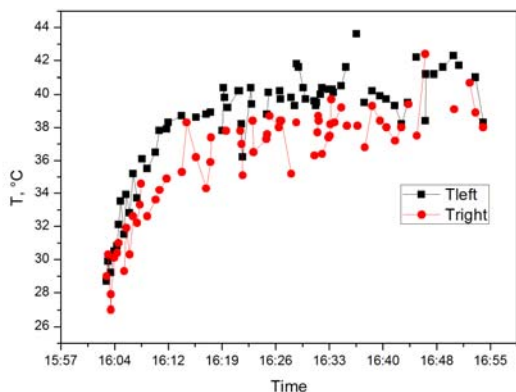
Аналогічно були експериментально досліджені інші типи вставок.

Зокрема на рис.5 та 6 представлені результати для «Зразка №7», про дослідженні якого було зафіксовано перевищення температурного обмеження у 95 °С, тобто випробування цього зразку не були успішними.

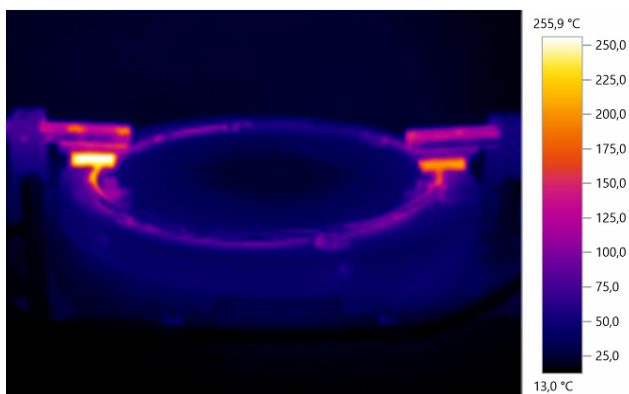
Як бачимо процес нагрівання є аперіодичним, тому визначимо постійну часу нагрівання досліджуваної системи «вставка контактний провід» графічним методом, на прикладі першого зразку (рис.7).

Результати визначення постійної часу для перших шести зразків представимо у таблиці 1.

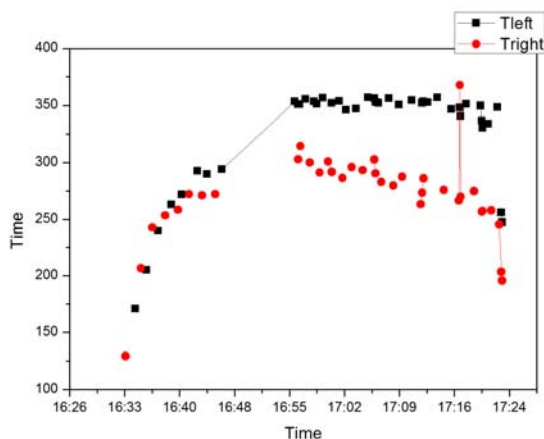
Для зразків вставок номер 6 (рисунок 8) визначення сталої часу неможливо, скільки випробування були припинені вже через 3 хв., що співрозмірно зі значенням сталої.



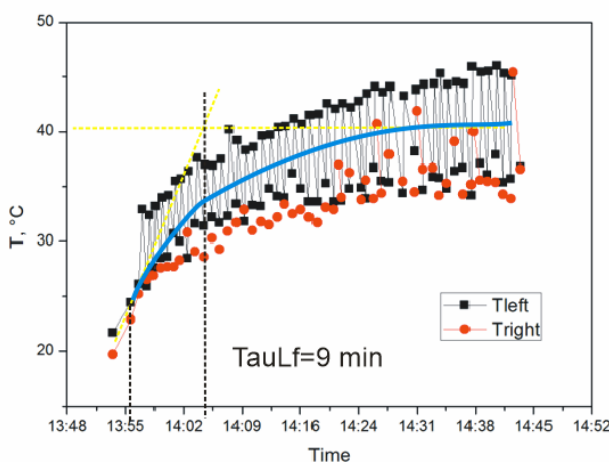
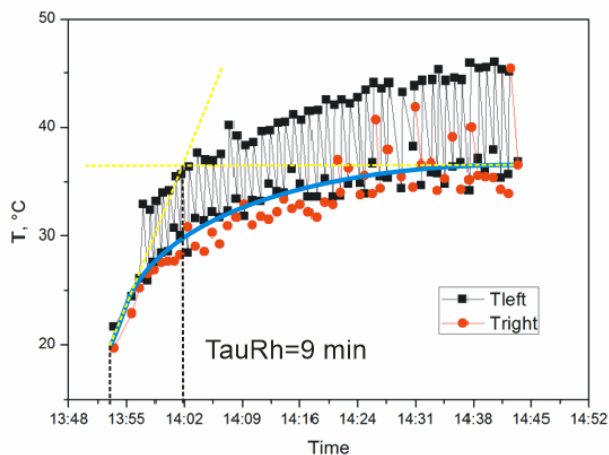
**Рисунок 4.** Графік зміни у часі температури нагрівання ковзного контакту при випробуванні зразка №2 при частоті обертання 205 об/хв та струмі 300 А.



**Рисунок 5.** Скриншот тепловізійної фотографії при випробуваннях зразка №7.



**Рисунок 6.** Графік зміни у часі температури нагрівання ковзного контакту при випробуванні зразка №7 при частоті обертання 205 об/хв та струмі 300 А.



**Рисунок 7.** Визначення сталої часу правої (верхній) та лівої (нижній) вставки нагрівання системи «вставка – контактний провід» при стендових випробуваннях першого зразка.

**Таблиця 1.** Значення сталих часу процесу нагрівання системи «вставка-контактний провід» під час стендових випробувань.

Номер зразка	1	2	3	4	5	6
Лівий тримач	9 хв.	9 хв.	10 хв.	3-4 хв.	9-10 хв.	Не визначено
Правий тримач	9 хв.	9 хв.	10 хв.	3-4 хв.	9-10 хв.	Не визначено

Для вставок четвертого типу характерним є швидке встановлення сталого режиму, з подальшим різким зростанням температури при початку роботи «мідь по міді», що призвело до заклинювання стенду.

Зразки 1, 2, 3 та 5 мають приблизно однакові сталі часу нагрівання, що вказую на їх ефективну роботу в ковзному контакті. Винятком є зразок номер 5 (рисунок 9), тому, що стенд було заклинено приблизно після 46 хв. роботи. Це пов'язано з особливостями

шарової побудови зразка – верхній шар має змащувальну смужку, а нижній – мідь. Тому після спрацювання верхнього шару починається робота «мідь по міді», як у зразка №6.



Рисунок 8. Фотографія зразка №6.



Рисунок 9. Фотографія зразка №5.



Рисунок 10. Фотографія зразка №1.

Безумовно теплові процеси в ковзному контакті є складними і формуються різними факторами. Врахування дії окремої складової на тепловий стан ковзного контакту є непростою задачею, а оскільки кінцевий ефект є сумою дій усіх факторів, то пропонується, з метою виконання порівняльного аналізу енергетичної ефективності ковзних контактів з різними типами струмознімальних вставок, використовувати узагальнений тепловий показник. Впровадження такого показника дасть можливість оцінювати контактну пару з точки зору її енергетичної ефективності, стійкості до зносу контактної вставки та контактного проводу.

Узагальнений тепловий показник роботи силового ковзного контакту представляє собою відношення [13]:

$$K_T = \frac{T_N}{T_B}, \quad (1)$$

де  $T_N$  – найбільша усталена температура контактної вставки, що досліджується, °С;

$T_B$  – температура контактної вставки, яка з усіх досліджуваних є найменшою, °С.

В рамках стендових випробувань стійкості до зношування контактних вставок позолотів струмоприймачів, були отримані усталені значення температур в зоні ковзного контакту утвореного фрагментом контактної вставки та мідним контактним проводом МФ-100, результати представлені в табл. 2.

**Таблиця 2.** Усталені значення температури різних типів контактних вставок отримані в ході стендових випробувань та відповідні їм значення  $K_T$

№ п/п	Тип контактної вставки	Усталена температура $T_{уст}$ , °С	$K_T$
1	Зразок 1	45	1
2	Зразок 3	75	1,67
3	Зразок 4	72	1,6
4	Зразок 5	62	1,38
5	Зразок 7	360	8
6	Зразок 8	230	5,1
7	Зразок 9	160	3,56
8	Зразок 11	145	3,22

Якщо теплові втрати в зоні ковзного контакту не виконують корисної роботи, а лише нагрівають контактний провід та накладку, тобто ці втрати безповоротні та знижують енергоефективність системи, то найбільш ефективною, з цієї точки зору, буде контактна пара утворена контактним проводом та композитною вставкою («Зразок 1») (рис.10), яка характеризується найнижчою температурою.

## V. ВИСНОВКИ

Отримані залежності між часом нагріву та значенням температури в місці контакту ковзного контакту, дозволили встановити значення сталої часу на рівні 9..10 хв., при якій випробування можна вважати успішними. На нашу думку зменшення сталої часу вказує на можливий негативний результат випробувань, який характеризується заклинюванням стенду. Фактично за значенням сталої часу нагрівання можливо здійснювати прогнозування успішності випробувань вже на початковому етапі.

Аналізуючи дані табл. 2 можна дійти наступного висновку – чим більше значення  $K_T$  досліджуваної контактної вставки в порівнянні з найбільш енергое-

фективною ( $K_T = 1$ ), тим більше потужності втрачається в ковзному контакті. Надлишкова теплота, що виділяється в ковзному контакті негативно впливає на його характеристики і сприяє більш інтенсивному його зношуванню. Подальшою задачею в рамках цієї роботи є встановлення кількісних зв'язків між значенням узагальненого теплового показника та величиною зносу елементів ковзного контакту.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Устименко, Д. В. Сучасний стан проблеми струмознімання на електрифікованих залізницях / Д. В. Устименко // Електрифікація транспорту. – 2016. – №12, С.71-75.
- [2] Большаков, Ю. Л. Дослідження властивостей струмознімальних елементів та їх впливу на ефективність роботи трибосистеми «контактний провід – вугільна вставка» / Ю. Л. Большаков, А. В. Антонов // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 6(60), С. 35–44.
- [3] Wu, G. Evolution of the electrical contact of dynamic pantograph–catenary system / G. Wu, W. Wei, G. Gao, J. Wu, Y. Zhou // Journal of Modern Transportation. – 2016. – №24. P. 132-138. <https://doi.org/10.1007/s40534-016-0099-1>.
- [4] Janahmadov, A. K, Javadov, M. Y. Synergetics and fractals in tribology. Springer. – 2016. 381 с. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-28189-6>
- [5] Ustyomenko, D.V. (2018). Physico-technological aspects of work of lubricant films in the tribosystem «overhead line – current collector contact strip» / D.V. Ustyomenko // Наука та прогрес транспорту. – 2018. – № 3(75), С. 78-86.
- [6] Струмознімальні елементи контактні струмоприймачів електрорухомого складу. Загальні технічні умови: ДСТУ ГОСТ 32680:2016 (ГОСТ 32680-2014, ІДТ). – [діє від 01.10.2016], 2016. – 16с.
- [7] Устименко, Д. В. Установка для експериментального дослідження зносу ковзного контакту «контактний провід – накладка» [текст] / Д. В. Устименко // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2018. – №14, с.29-32.
- [8] Martina Grandin, Urban Wiklund Influence of mechanical and electrical load on a copper/copper-graphite sliding electrical contact / Grandin Martina, Wiklund Urban // Tribology International. – 2018. – Vol. 121. P. 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.01.004>.
- [9] Сидоров, О.А. Исследование и прогнозирование износа контактных пар систем токосъема с жестким токопроводом: Монография / О.А. Сидоров, С.А. Ступаков. - Москва: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте». – 2012. 174 с.
- [10] Сидоров, О. А. Исследования электромеханического изнашивания контактных пар устройств токосъема электрического транспорта / О. А. Сидоров, В. М. Филиппов, С. А. Ступаков // Трение и износ. – 2015. – Т. 36. – № 5. С. 511-517.
- [11] Shimanovsky, Alexandr O., Kapliuk, Inha I. Finite Element Modeling of the Locomotive Pantograph – Contact Wire Interaction / Alexandr O. Shimanovsky, Inha I. Kapliuk // Proceedings of 23rd International Conference: «МЕХАНИКА 2018». – 2018. С. 145-149.
- [12] Wu, G. Characteristics of the Sliding Electric Contact of Pantograph/Contact Wire Systems in Electric Railways / G. Wu, J. Wu, W. Wei ID, Y. Zhou, Z. Yang, G. Gao // Energies. – 2018. – 11(1), 17. <http://dx.doi.org/10.3390/en11010017>.
- [13] Устименко, Д. Особливості врахування теплового стану ковзного контакту при визначенні енергетичних показників системи струмознімання електрорухомого складу залізниць / Д. Устименко, А. Муха, М. Аль Саїд, С. Романов, Т. Себієв // Енергооптимальні технології, логістика та безпека на транспорті: Матеріали міжнародної науково-практичної конференції (ЕОТ-2019). – 2019, С. 14-17.
- [14] Провода контактные из меди и ее сплавов. Технические условия: ГОСТ 2584-86. – [действует от 1988-01-01]. – М.: ИПК изд. стандартов, 1998. – 9с. – (Межгосударственный стандарт).  
*Стаття надійшла до редакції 05.05.2021*

## ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ СИЛЬНОСТРУМОВОГО КОНТАКТА ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА ВО ВРЕМЯ ПРОВЕДЕНИЯ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ

МУХА А.Н.

д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедры электротехники и электромеханики Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, Днепр, Украина, e-mail: mukha.andrii@gmail.com;

УСТИМЕНКО Д.В.

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электротехники и электромеханики Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, Днепр, Украина, e-mail: ustimenko.1979@gmail.com;

АЛЬ САИД АХМАД

аспирант кафедры электротехники и электромеханики Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, Днепр,

МОХАММАД ДИАБ    Україна, e-mail ahmadesraa20@gmail.com.

**Цель работы.** Проведение анализа результатов стендовых испытаний скользящих электрических контактов электротранспорта с целью определения показателей теплового режима скользящего контакта.

**Методы исследований.** Исходные данные получены во время натурных экспериментов на специализированном стенде в лабораторных условиях, которые проводились с целью определения износа контактного провода вставками разных типов для пантографов электроподвижного состава железных дорог. Для определения температуры контактного провода в месте скользящего контакта применялся неразрушающий бесконтактный метод контроля с помощью тепловизора.

**Полученные результаты.** В ходе экспериментальной части исследований были получены тепловизионные фотографии, на которых зафиксированы температуры в месте скользящего контакта между вставкой пантографа электроподвижного состава и контактным проводом, установленным на испытательном диске. Эти температурные значения фиксировались с определенным временным интервалом, позволяющим построить зависимости изменения теплового режима во времени, определить устойчивое время нагрева системы «вставка-контактный провод» испытательного стенда и получить конечное значение температуры в конце испытаний. Принимая образец вставки при котором получена минимальная температура в зоне скользящего контакта в качестве эталонного, становится возможным по значению температуры контактного провода в зоне скользящего контакта прогнозировать конечный результат испытаний других типов накладок.

**Научная новизна.** Показателями температурных режимов скользящего контакта электротранспорта во время стендовых испытаний получены впервые, предложенный относительный температурный показатель позволяет по результатам стендовых испытаний прогнозировать качественные показатели скользящего контакта электротранспорта.

**Практическая ценность.** Стендовые испытания вставок токоприемников электротранспорта являются длительной процедурой, нормативный показатель количества проходов токоприемника на стенде равен 500 тысяч проходов, что требует значительных затрат времени, энергии, человеческих ресурсов и т.д. Предложенные по результатам испытаний показатели, а именно постоянная время нагрева и относительный температурный показатель, позволяет реализовать двухэтапные испытания. На первом этапе, продолжительностью 10 тысяч оборотов диска испытательного стенда определяются предложенные показатели и сравниваются с соответствующими эталонными, в случае их соответствия становится возможным прогнозировать конечный результат испытаний как успешный (износ контактного провода меньше нормы) или не успешный. В последнем случае необходимость проведения второго этапа испытаний до 500 тыс. оборотов становится под вопросом, поскольку конечный результат будет отрицательным, а ресурсы на испытания будут задействованы значительные, а потому эти испытания нецелесообразны.

**Ключевые слова:** вставка пантографа; скользящий сильнотоковый контакт; износ контактного провода; температура контактного провода; стендовые испытания.

## THERMAL MODES OF OPERATION OF POWER-CURRENT CONTACT OF ELECTRIC TRANSPORT DURING CONDUCT OF BENCH TESTS

MUKHA A.M.

Sci.D, Professor, Head of the Department «Electric Engineering and Electromechanics» Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Dnipro, Ukraine., e-mail:mukha.andrii@gmail.com;

USTYMENKO D.V.

PhD, docent of the Department «Electric Engineering and Electromechanics» Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Dnipro, Ukraine, e-mail: ustimenko.1979@gmail.com;

MOHAMMAD DIAB  
AL SAID AHMAD

Postgraduate student, Department «Electric Engineering and Electromechanics» Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Dnipro, Ukraine, e-mail: e-mail: ahmadesraa20@gmail.com.

**Purpose.** Analysis of the results of bench tests of sliding electrical contacts of electric vehicles, in order to determine the thermal regime of the sliding contact.

**Methodology.** The initial data were obtained during field experiments on a specialized stand in the laboratory, which were carried out to determine the wear of the contact wire inserts of different types for pantographs of electro-rolling stock of railways. To determine the contact wire temperature at the place of sliding contact, a non-destructive non-contact method of control using a thermal imager was used.

**Findings.** During the experimental part of the research, the thermal imaging photographs were obtained, they recorded the temperatures at the place of sliding contact between the insert of the pantograph of the electric rolling stock and the contact wire installed on the test disk. These temperature values were recorded with a certain time interval, which allowed to build the dependences of changes in thermal regime over time, to determine the heating time constant of the "insert-contact wire" of the test bench and to obtain the final temperature value at the end of tests. Accepting the

insert sample in which the minimum temperature in the area of sliding contact is as a reference, it becomes possible by the value of the temperature of the contact wire in the area of sliding contact to predict the final test result of other types of pads.

**Originality.** Indicators of temperature modes of sliding contact of electric vehicles during bench tests are obtained for the first time, the proposed relative temperature indicator allows to predict the results of bench tests of qualitative indicators of sliding contact of electric vehicles..

**Practical value.** Bench tests of inserts of current collectors of electric vehicles are a long procedure, the normative indicator of the number of passes of the current collector on the stand is equal to 500 thousand passes, which requires significant expenditure of time, energy, human resources and others. The indicators proposed according to the test results, namely the heating time constant and the relative temperature index, allow to carry out two-stage tests. At the first stage, with a duration of 10 thousand revolutions of the test bench disk, the proposed indicators are determined and compared with the corresponding reference, in case of their compliance it becomes possible to predict the final test result as successful (contact wire wear less than normal) or unsuccessful. In the latter case, the need for the second stage of testing up to 500 thousand revolutions is questionable, because the end result will be negative, and the significant resources will be involved in the test, and therefore these tests are impractical.

**Keywords:** pantograph insert; sliding high-current contact; wear of a contact wire; contact wire temperature; bench tests.

## REFERENCES

- [1] Ustyomenko, D. V. (2016). Current state of the problem on current collection of electrified railways. *Electrification of transport*, 12, 71-75. (in Ukrainian)
- [2] Bolshakov, Y. L., & Antonov, A. V. (2015). Investigation of properties of current collector elements and their effect on the performance of tribosystem «contact wire–current collector element». *Science and Transport Progress*, 6(60), 35-44. <https://doi.org/10.15802/stp2015/57006> (in Ukrainian)
- [3] Guangning Wu, Wenfu Wei, Guoqiang Gao, Jie Wu, & Yue Zhou (2016). Evolution of the electrical contact of dynamic pantograph–catenary system. *Journal of Modern Transportation*, 24(2), 132-138. <https://doi.org/10.1007/s40534-016-0099-1> (in English)
- [4] Janahmadov, A. K., & Javadov, M. Y. (2016). Synergetics and fractals in tribology. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-28189-6> (in English)
- [5] Ustyomenko, D.V. (2018). Physico-technological aspects of work of lubricant films in the tribosystem «overhead line – current collector contact strip». *Nauka ta prohres transportu – Science and Transport Progress*, 3(75), 78-86. (in English)
- [6] Strumoznimalni elementy kontakti strumopryimachiv elektrorukhomoho skladu. Zahalni tekhnichni umovy: DSTU GOST 32680:2016 (GOST 32680-2014, IDT). (in Ukrainian)
- [7] Ustyomenko, D.V. (2018). Ustanovka dlya eksperimentalnogo doslidzhennya znosu kovznogo kontaktu «kontaktniy provid – nakladka». *Elektromagnitna sumislst ta bezpeka na zaliznichnomu transporti*, 14, 29-32. (in Ukrainian)
- [8] Martina Grandin, & Urban Wiklund (2018) Influence of mechanical and electrical load on a copper/copper-graphite sliding electrical contact. *Tribology International*, 121, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.01.004>. (in English)
- [9] Sidorov, O. A., & Stupakov, S. A. (2012). Issledovanie i prognozirovanie iznosa kontaktnykh par sistem tokosema s zhestkim tokoprovodom: monografiya. Moscow: FGBOU «Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte». (in Russian)
- [10] Sidorov, O. A., Filippov, V. M. & Stupakov, S. A. (2015). Issledovaniya elektromechanicheskogo iznashivaniya kontaktnykh par ustroystv tokos'ema elektricheskogo transporta. *Trenie i iznos*, vol. 36. – № 5, 511-517. (in Russian)
- [11] Shimanovsky Alexandr O., & Kapliuk Inha I. (2018). Finite Element Modeling of the Locomotive Pantograph – Contact Wire Interaction. *Proceedings of 23rd International Conference: «MECHANIKA 2018»*, P. 145-149. (in English)
- [12] Wu G., Wu J., Wei W., Zhou Y., Yang Z., & Gao G. (2018). Characteristics of the Sliding Electric Contact of Pantograph/Contact Wire Systems in Electric Railways. *Energies*, 11(1), 17. <http://dx.doi.org/10.3390/en11010017>. (in English)
- [13] Ustyomenko D., Mukha A., Al Said M., Romanov S., Sebiiev T. Osoblyvosti vrakhuvannya teplovoho stanu kovznogo kontaktu pry vyznachenni enerhetychnykh pokaznykiv systemy strumoznimanii elektrorukhomoho skladu zaliznyts. *Enerhooptymalni tekhnologii, lohistyka ta bezpeka na transporti: Materialy mizhnarodnoi naukovopraktychnoi konferentsii (EOT-2019)*, P. 14-17. (in Ukrainian)
- [14] Provoda kontaktnyie iz medi i ee splavov. *Tekhnicheskie usloviya*. (1986). GOST 2584-86-from 01 January 1988. Moscow: IPK standards publishing house. (in Russian).



УДК 621.316.13

## ПІДСИСТЕМА ОБРОБКИ ВИБІРОК ДАНИХ АКТИВНОЇ ТА РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ТРАНСФОРМАТОРНОЇ ПІДСТАНЦІЇ

- ТОДОРОВ О.В. аспірант, кафедри систем електроспоживання та енергетичного менеджменту Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського, Кременчук, Україна, e-mail: olehtodorov@gmail.com;
- БЯЛОБРЖЕСЬКИЙ О.В. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри систем електроспоживання та енергетичного менеджменту Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського, Кременчук, Україна, e-mail: seemal@kdu.edu.ua;
- РЕВА І.В. аспірант, кафедри систем електроспоживання та енергетичного менеджменту Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського, Кременчук, Україна, e-mail: cgdizainer@gmail.com;
- БЕЗЗУБ М.А. аспірант, кафедри систем електроспоживання та енергетичного менеджменту Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського, Кременчук, Україна, e-mail: bezzubmax@gmail.com;

**Мета роботи.** Застосування статистичного аналізу на об'ємні вибірки даних параметрів споживання електричної енергії, для зменшення обсягу даних про потужності вузла мережі, які зберігатимуться.

**Методи дослідження.** Використання методів статистичної обробки даних, в системі графічного програмування LabVIEW.

**Отримані результати.** Електрична енергія є одним з видів енергії обсяги генерування, транспортування, розподілу та використання якої постійно зростають. На всіх зазначених етапах відбувається контроль параметрів швидкості зміни електричної енергії – потужності. Потужність характеризується певними параметрами що підлягають безперервному моніторингу. Зміна потужності в умовах промислових підприємств має складний характер з певними стохастичними складовими. Необхідність фіксації детальної інформації викликає зростання обсягу даних, які підлягають зберіганню. Як наслідок, виникає завдання обробки даних про обсяги електричної енергії та параметри електричної потужності зі зменшенням обсягу даних та збереженням інформативності. Грунтуючись на статистичній концепції нормального розподілу, в середовищі графічного програмування побудовано підсистему обробки даних на інтервалах вибірки активної та реактивної потужностей секції низької напруги знижуючої підстанції. З використанням показників характеристики нормального розподілу активної та реактивної потужностей, виконано аналіз їх напівдобових вибірок. Виділені інтервали на яких суттєво розрізняються показники нормального розподілу, що дозволило сформулювати висновки про наявність режимів наближених до холостого ходу.

**Наукова новизна.** Встановлено, що через складність охоплення великих проміжків часу за умови фіксації даних про параметри електричної потужності, виникає дилема щодо обсягу результуючої інформації та її деталізації, для уникнення втрат інформації запропоновано процедуру, що базується на законі нормального розподілу вибірки даних, та в тривалих процесах знижує обсяг результуючих даних, які підлягають зберіганню, з можливістю фіксації суттєвих відхилень за показниками ексцесу та асиметрії відповідної вибірки.

**Практична цінність.** Застосовуючи в системі моніторингу при довгостроковому спостереженні за параметрами електричної потужності запропонований метод можливо значно зменшити кількість даних під час передачі основної інформації, рівня потужності та діапазону коливань, а також, за необхідності, використати додаткову інформацію про зміни в інтервалах спостереження, виражені через ексцес та асиметрію.

**Ключові слова:** активна потужність; реактивна потужність; нормальний розподіл; ексцес; асиметрія; математичне очікування; середнє квадратичне відхилення.

### І. ВСТУП

Електрична енергія є поширеною формою енергії. На сучасному етапі інтелектуалізації електроенергетики та ростом встановлених потужностей альтернативних джерел суттєва увага приділена якості електричної енергії. В частині споживання також ситуація складна. Все більша кількість споживачів оснащується напівпровідниковими перетворювачами. При цьо-

му на якість споживання електричної енергії звертає увагу меншість з них. Тенденції розвитку автоматизованих систем контролю відкривають для диспетчерського персоналу широкі можливості збору та обробки інформації, в результаті система все більш набуває ознак SmartGrid [1] - [2]. Провідні виробники надають широкий спектр обладнання для реалізації автоматизованих систем контролю та управління процесом споживання електричної енергії [3]. Застосовують

сучасні техніки розрахунку показників якості з позиції електричної потужності [4] - [5]. Вчені [6] - [7] розробляють методи спрямовані на максимізацію корисної інформації з мінімізацією її кількості та забезпеченням якості.

## II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Для розширення спектру інформації по стан мережі та розподілу навантаження, за часту застосовують статистичний аналіз, математичним апаратом якого є теорія ймовірності. Так на основі статистичного аналізу розробляються, як приклад системи для визначення ймовірності виникнення несиметрії в мережі та розширення кількості опорних показників для її позбавлення [8]. Побудова рівневих систем спостереження за рівнем споживання, основаних на усередненні значень декількох діб, порівняння з добовими значеннями та визначення відхилень [9]. Запропоноване рішення спрямовано на характеристику процесу споживання електричної енергії з позиції обсягів. Аналогічне рішення використано для порівняння поточного режиму енергоспоживання до нормальної роботи для виявлення відхилень та проведення аналізу для визначення походження відхилень [10]. Проведення дослідів основаних на кореляційному аналізі з метою виявлення зв'язку використання електроенергії між різними галузями промисловості, що дозволить більш точно планувати об'єми електроенергії при виробництві [11]. Але при проведенні аналізу автори спираються лише на вихідні дані зумовлені активною потужністю. Статистична обробка даних активної потужності використана дослідниками [12], для контролю достовірності вимірювання активного навантаження промислових підприємств, на підставі аналізу динаміки зміни навантаження та перших її приростів. Обмеження використання в цьому випадку лише активної потужності невілює повністю питання якості електричної енергії.

При цьому існує ряд складових електричної потужності рекомендованих для спостереження, з урахуванням яких можливо детально розібрати склад електричної потужності мережі [13] - [14]. При роботі з системами моніторингу на основі даних величин, доводиться працювати з великою кількістю даних [15]. Для її зменшення виникає необхідність нехтувати частиною величин або виконувати обробку даних з метою зменшення їх обсягу.

## III. МЕТА РОБОТИ

Застосування статистичного аналізу на об'ємні вибірки даних, для зменшення кількості даних зі збереженням інформації по стану зміни потужності в мережі.

## IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГУ МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Зважаючи на те, що споживання електричної енергії, як показано в [9] підкоряється закону норма-

льного розподілу в якості методу аналізу використано модель нормального розподілу. Нормальний розподіл є важливою частиною математичного аналізу і часто використовується у випадках, коли на досліджувану величину впливає велика кількість випадкових факторів. До таких величин можна віднести складові потужності електричної енергії, зокрема активну та реактивну потужності.

Як правило для аналізу показників нормальний розподіл використовують чотири основних величини які доволі якісно характеризують вибірку [9]. Під вибіркою  $x$  будемо розуміти величини активної та реактивної потужностей зафіксовані в певні моменти часу. Математичне очікування  $M$  – центральне значення розподілу, є середнім арифметичним значенням всієї вибірки (рис. 1) і розраховується за формулою:

$$M = \sum_{i=0}^N \frac{x_i}{N} \quad (1)$$

де  $N$  – загальна кількість значень вибірки;  $x_i$  – значення вибірки.

Для оцінювання розсіювання величини відносно центрального значення  $M$  використовують дисперсію, або квадрат середньоквадратичного відхилення:

$$D = \sigma^2 = \sum_{i=0}^N \frac{(x_i - M)^2}{N - 1} \quad (2)$$

Для оцінки нерівномірності форми розподілу величини використовують коефіцієнт асиметрії  $A$  що визначає симетричність. При значенні від'ємному в лівій частині (рис 1.) довший спад функції, при додатному в правій частині. Визначається коефіцієнт асиметрії через момент третього порядку  $\mu_3$ :

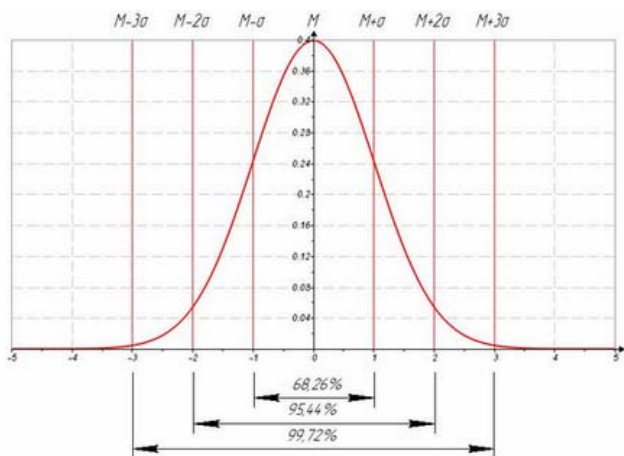
$$A = \frac{\mu_3}{\sigma^3}; \quad \mu_3 = \sum_{i=0}^N \frac{(x_i - M)^3}{N - 1} \quad (3)$$

Відхилення закону розподілу також характеризує коефіцієнт ексцесу  $E$  – показник гостроти піку розподілу. Позитивне значення коефіцієнту ексцесу характеризує збільшення «гостроти» розподілу відносно «еталонного», негативне зменшення. Визначають коефіцієнт асиметрії через момент четвертого порядку  $\mu_4$ :

$$E = \frac{\mu_4}{\sigma^4} - 3; \quad \mu_4 = \sum_{i=0}^N \frac{(x_i - M)^4}{N - 1} - 3 \quad (4)$$

В ідеальному випадку при нормальному розподілу величини асиметрії  $A$  та ексцесу  $E$  рівні нулю ( $A=0$ ;  $E=0$ ). В реальних процесах через випадковість дані значення мають відносно невеликі відхилення і при збільшенні кількості даних дані значення все більше наближаються до нуля. Значні відхилення коефіцієнтів асиметрії та ексцесу можуть означати, що серед ряду впливових факторів є ті, що мають більший вплив на процес по відношенню до інших або

навпаки вплив випадкових факторів є недостатньо значним і процес має відносно стабільне протікання.



**Рисунок 1.** Графік нормального розподілу з довірчими інтервалами

За умови вибірки потужності з нормальним розподілом ймовірність того, що відхилення випадкової величини від свого математичного сподівання більше ніж на три середньоквадратичних відхилення близька до нуля. Використаємо це правило для спостереження в часі за процесом зміни потужності. Для нормального розподілу характерними є три інтервали існування елемента у виборці, за якими вірогідність існування близька до нуля (рис. 1):

Інтервал  $[M - \sigma; M + \sigma]$  складає 68.26% від всіх величин випадкового процесу:

$$P_1 = \int_{M-\sigma}^{M+\sigma} f(t) dt = F(M + \sigma) - F(M - \sigma) \quad (5)$$

де  $f(t)$  – щільність нормального розподілу;  $F(M + \sigma)$  – значення функції нормального розподілу в точці вище математичного сподівання  $M + \sigma$ ;  $F(M - \sigma)$  – значення функції нормального розподілу в точці нижче математичного сподівання  $M - \sigma$ .

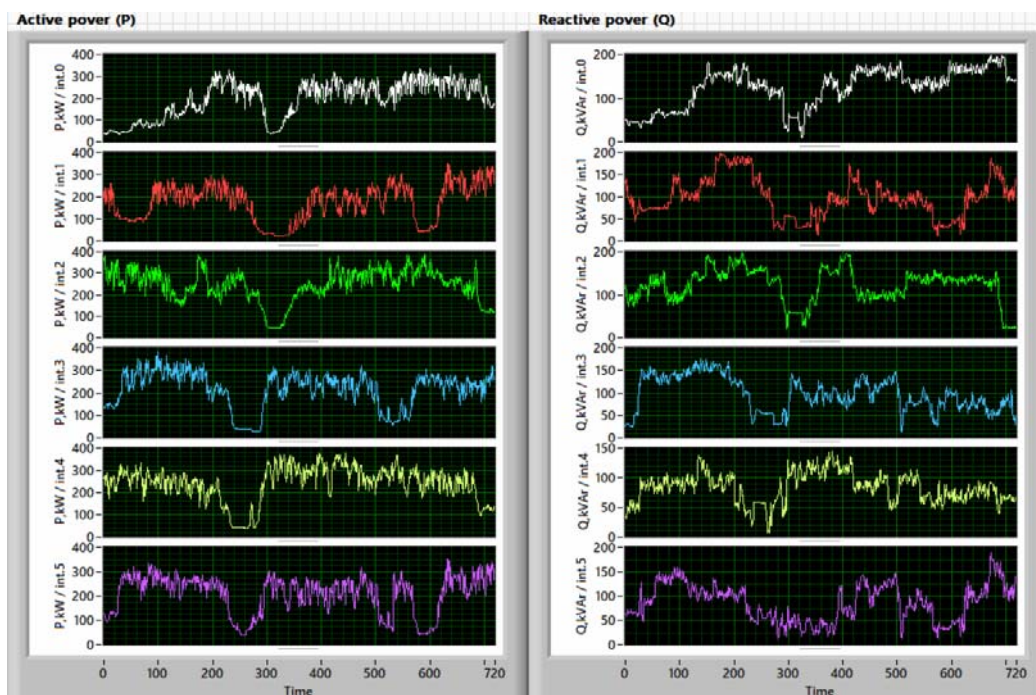
Інтервал  $[M - 2\sigma; M + 2\sigma]$  складає 95.44% від всіх величин випадкового процесу:

$$P_2 = \int_{M-2\sigma}^{M+2\sigma} f(t) dt = F(M + 2\sigma) - F(M - 2\sigma) \quad (6)$$

Інтервал  $[M - 3\sigma; M + 3\sigma]$  складає 99.72% від всіх величин випадкового процесу:

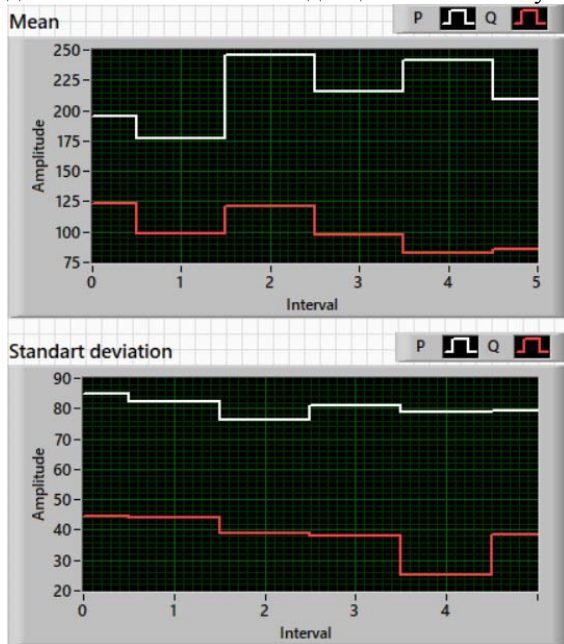
$$P_3 = \int_{M-3\sigma}^{M+3\sigma} f(t) dt = F(M + 3\sigma) - F(M - 3\sigma) \quad (7)$$

Для застосування статистичного аналізу, було проведено збір даних активної та реактивної потужностей з шин вторинної напруги головної знижувальної підстанції ГПЗ-2 підприємства гірничовидобувної промисловості (рис. 2). Збір даних виконаний «Енергомонітор-3.3Т1». Реєстрація даних по електроенергії проводилась протягом трьох діб (72 години) з записом результатів кожену хвилину, загалом зафіксовано  $N_s=4320$  відліків. Загальну сукупність розділено на 6 інтервалів (рис. 2), що зосереджують в собі  $N=720$  відліків тривалістю у 12 годин.

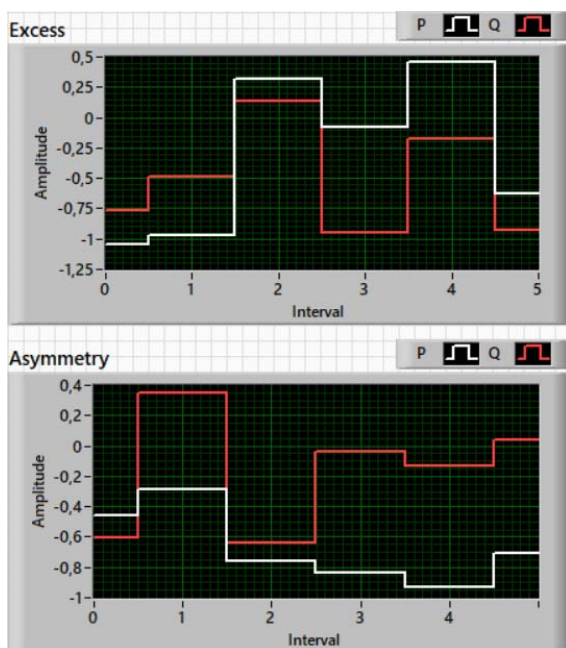


**Рисунок 2.** Графік активної та реактивної потужностей розділених на 12 годинні інтервали.

З використанням пристрою, для виміру показників якості електроенергії та перевірки пристроїв обліку Розрахунки виконано в середовищі розробки та виконання програм LabVIEW. В кожному з інтервалів визначаються чотири показники (рис. 3., 4): математичне сподівання; середнє квадратичне відхилення; ексцес; асиметрія. Математичне сподівання визначає середнє значення потужності на проміжку а також дозволяє стежити за тенденцією зміни потужності.



**Рисунок 3.** Графіки математичного сподівання та середнього квадратичного відхилення, активної та реактивної потужності для інтервалів 0-5



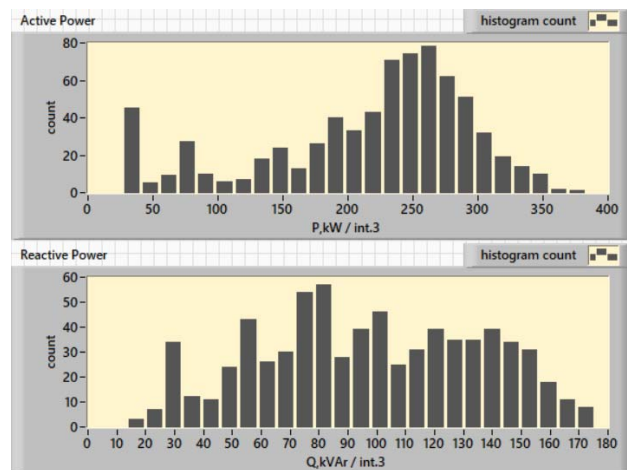
**Рисунок 4.** Графіки величин ексцесу та асиметрії, активної та реактивної потужності для інтервалів 0-5

Середнє квадратичне відхилення вказує на основний діапазон відхилень від математичного сподівання та його зміну. Ексцес та асиметрія вказують на відхилення від нормального в процесі.

Наприклад взявши до уваги показники асиметрії та ексцесу найбільш неоднозначного інтервалу номер 3 (рис.2.) та їх графіки щільності розподілу (рис. 5.). Активна потужність має значну від’ємну асиметрію ( $A_{P/int3} = -0.838$ ) та не значний ексцес ( $E_{P/int3} = -0.082$ ), що означає наявність значного падіння, при тому форма розподілу наближена до «еталонної». Реактивна потужність має протилежні показники, незначну асиметрію ( $A_{Q/int3} = -0.034$ ) та великий ексцес ( $E_{Q/int3} = -0.95$ ), що означає приблизно однакову ширину розподілу процесу відносно математичного сподівання, при тому з відхиленням більше до рівномірного розподілу.

В якості алгоритма обробки в системі контролю з використанням правила 3σ можливо виконати систему для виявлення значних відхилень:

$$y_i = \begin{cases} 3 & \text{if } M + 3\sigma < i \\ 2 & \text{if } M + 2\sigma < i \leq M + 3\sigma \\ 1 & \text{if } M + \sigma < i \leq M + 2\sigma \\ 0 & \text{if } M - \sigma \leq i \leq M + \sigma \\ -1 & \text{if } M - 2\sigma \leq i < M - \sigma \\ -2 & \text{if } M - 3\sigma \leq i < M - 2\sigma \\ -3 & \text{if } M - 3\sigma > i \end{cases} \quad (8)$$



**Рисунок 5.** Графіки щільності розподілу активної та реактивної потужності третього інтервалу

Як приклад на основі системи розроблено програму та проведено експеримент щодо активної та реактивної потужності (рис. 6.). У довгостроковій перспективі відхилення. Активна потужність має довгий інтервал з високою частотою стрибків, що не перевищує рівень  $M + 2\sigma$ , довгим падінням на рівні  $M - 3\sigma$  і довгим падінням на рівні  $M - 2\sigma$ . Реактив-

на потужність має інтервал з коливаннями до рівня  $M + 2\sigma$ , падіння на рівні  $M - 2\sigma$  і великий інтервал коливань у діапазоні  $[M - 2\sigma; M + 2\sigma]$ .

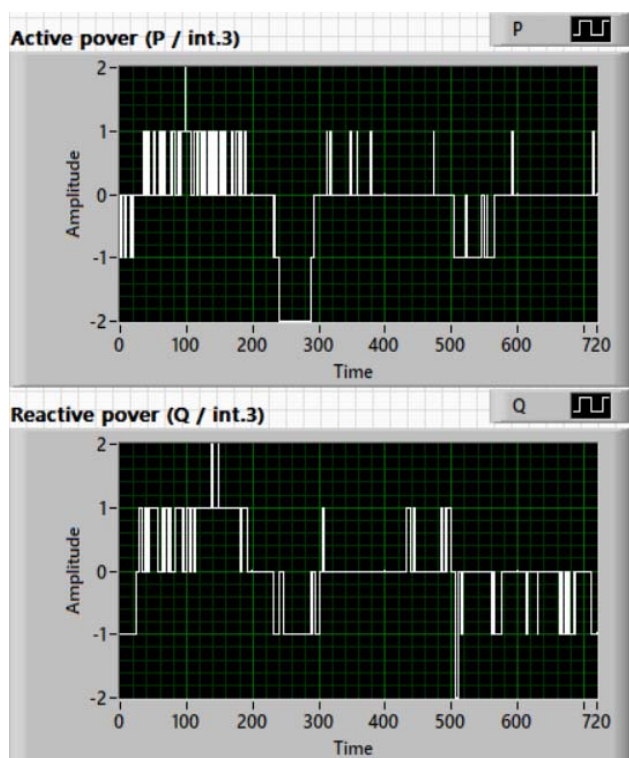


Рисунок 6. Фіксація виходу показників за межі довірчих інтервалів

## V. ВИСНОВКИ

При довгостроковому спостереженні за потужністю запропонований метод значно зменшує кількість даних під час передачі основної інформації, рівня потужності та діапазону коливань, а також додаткову інформацію про зміни в інтервалах спостереження, виражені через ексцес та асиметрію.

Встановлено, що через складність охоплення великих проміжків часу виникає дилема щодо раціонального обсягу результуючої інформації, що може привести до її втрат. Для уникнення втрат інформації необхідно проводити операції по додатковій обробці даних, що в тривалих процесах безумовно знижує рівень її деталізації, при тому зберігаючи узагальнену інформацію поведінки процесів за проміжок спостереження.

В середовищі LabView розроблено систему в основу якої закладені принципи нормального розподілу. В результаті проведення дослідів на підставі тридобових даних активної та реактивної потужностей, встановлено, що показник середнього квадратичного відхилення вказує на збереження основного проміжку коливань активної потужності та спад проміжку в реактивної потужності.

В результаті досліджень характеристик нормаль-

ного розподілу вибірки активної та реактивної потужності відзначено значну асиметрію кривої розподілу реактивної потужності з від'ємним значенням відповідного коефіцієнту. Спостерігаються суттєві зміни коефіцієнту ексцесу кривої нормального розподілу як реактивної так і активної потужності.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Khan, Z. A., Adil, M., Javaid, N., Saqib, M. N., Shafiq, M., & Choi, J. -. (2020). Electricity theft detection using supervised learning techniques on smart meter data. *Sustainability* (Switzerland), 12(19), 1-25. doi:10.3390/su12198023.
- [2] Meyers, B. E., Apostolaki-Iosifidou, E., and Schelhas, L. T., Solar Data Tools: Automatic Solar Data Processing Pipeline. *2020 47th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 2020, pp. 0655-0656, doi: 10.1109/PVSC45281.2020.9300847.
- [3] Тодоров О. В., Бялобржеський О. В., Аналіз структури сучасної автоматизованої системи контролю та обліку електроенергії, первинних пристроїв збору та обробки даних. *Вісник Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського*, №1, Лютий 2020, Кременчук, Україна, С. 145-150. DOI: 10.30929/1995-0519.2020.1.145-150
- [4] Babakmehr, M., Sartipizadeh, H., & Simões, M. G. (2020). Compressive informative sparse representation-based power quality events classification. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 16(2), 909-921. doi:10.1109/TII.2019.2922964
- [5] Huang Zhiwei et al., Transient power quality assessment based on big data analysis. *2014 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*, 2014, pp. 1308-1312, doi: 10.1109/CICED.2014.6991919.
- [6] Bialobrzheskyi, O., Bondarenko, S., & Yakymets, S. (2020). Innovative technique for evaluating electric power distortion in cable transmission line. *Scientific Bulletin of National Mining University*, 2020(1), 58-63. doi:10.33271/nvngu/2020-1/058
- [7] Xiaoping, H., and Yonghong, H., Data processing technology used in power quality measurement system. *2009 7th International Conference on Information, Communications and Signal Processing (ICICS)*, 2009, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICICS.2009.5397655.
- [8] Романова В. В., Хромов С. В., Применение методов математической статистики для прогнозирования возникновения несимметрии напряжения в электрических сетях. *Вестник Южно-Уральского государственного университета*, №17, Октябрь 2017, Челябинск, Российская Федерация, С. 59-71. doi: 10.14529/power170407
- [9] Zurkafli A. Z, N. Zaini and Latip M. F. A., Personal Energy Auditor based on Energy Consumption Rat-

- ing using Normal Distribution for Energy Efficiency. *2020 10th IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering (ICCSCE)*, Penang, Malaysia, 2020, pp. 119-124, doi: 10.1109/ICCSCE50387.2020.9204942.
- [10] Burgas, L., Melendez, J., & Colomer, J. (2014). Principal Component Analysis for Monitoring Electrical Consumption of Academic Buildings. *Energy Procedia*, 62, 555–564. doi:10.1016/j.egypro.2014.12.417
- [11] Zhang, L., Huang, Z., Li, Z., Guo, K.: Research on the correlation of monthly electricity consumption in different industries: a case study of Bazhou county. *Procedia Comput. Sci.* 139, 496–503 (2018). doi:10.1016/j.procs.2018.10.245
- [12] Анищенко В. А., Писарчук Т. В. (2020). Контроль достоверности измерений нагрузки промышленного предприятия на основе анализа динамики ее изменений. *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*, №63(5), Минск, Республика Беларусь, С. 363-410. doi:10.21122/1029-7448-2020-63-5-393-410
- [13] Zagirnyak, M. V., Prus, V. V., Nikitina, A. V., Grounds for efficiency and prospect of the use of instantaneous power components in electric systems diagnostics. *Przeglad Elektrotechniczny*, vol. 82, no. 12, pp. 123-125, 2006.
- [14] Todorov, O., Bialobrzheskyi, O., & Andrii, S. (2020). Application of IEEE 1459-2010 for the power investigation a traction substation transformer secondary voltage. *Paper presented at the 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology, KhPI Week 2020 - Conference Proceedings*, 199-204. doi:10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250094
- [15] Todorov, O., Bialobrzheskyi, O., & Bondarenko, S. (2020). Virtual complex prototype for metering a three-phase network electric power quantity and quality. *Paper presented at the Proceedings of the 25th IEEE International Conference on Problems of Automated Electric Drive. Theory and Practice, PAEP 2020*, doi:10.1109/PAEP49887.2020.9240845

Стаття надійшла до редакції 25.05.2021

## ПОДСИСТЕМА ОБРАБОТКИ ВЫБОРОК ДАННЫХ АКТИВНОЙ И РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРНОЙ ПОДСТАНЦИИ

- ТОДОРОВ О.В. аспирант, кафедры систем электроснабжения и энергетического менеджмента Кременчугского национального университета им. Михаила Остроградского, Кременчуг, Украина, e-mail: olehtodorov@gmail.com;
- БЯЛОБРЖЕСКИЙ О.В. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры систем электроснабжения и энергетического менеджмента Кременчугского национального университета им. Михаила Остроградского, Кременчуг, Украина, e-mail: seemal@kdu.edu.ua;
- РЕВА І.В. аспирант, кафедры систем электроснабжения и энергетического менеджмента Кременчугского национального университета им. Михаила Остроградского, Кременчуг, Украина, e-mail: cgdizainer@gmail.com;
- БЕЗЗУБ М.А. аспирант, кафедры систем электроснабжения и энергетического менеджмента Кременчугского национального университета им. Михаила Остроградского, Кременчуг, Украина, e-mail: bezzubmax@gmail.com;

**Цель работы.** Применение статистического анализа на объемные выборки данных параметров потребления электрической энергии, для уменьшения объема данных о мощности узла сети, которые будут храниться.

**Методы исследования.** Использование методов статистической обработки данных, в системе графического программирования LabVIEW.

**Полученные результаты.** Электрическая энергия является одним из видов энергии объема генерации, транспортировки, распределения и использования которой постоянно растут. На всех указанных этапах происходит контроль параметров скорости изменения электрической энергии - мощности. Мощность характеризуется определенными параметрами подлежащих непрерывному мониторингу. Изменение мощности в условиях промышленных предприятий имеет сложный характер с определенными стохастическими составляющими. Необходимость фиксации детальной информации вызывает рост объема данных, подлежащих хранению. Как следствие, возникает задача обработки данных об объемах электрической энергии и параметры электрической мощности с уменьшением объема данных и сохранением информативности. Основываясь на статистической концепции нормального распределения, в среде графического программирования построено подсистему обработки данных на интервалах выборки активной и реактивной мощностей секции низкого напряжения понижающей подстанции. С использованием показателей характеристики нормального распределения активной и реактивной мощностей, выполнен анализ их Полусуточная выборки. Выделенные интервалы, на которых существенно различаются показатели нормального распределения, что позволило сформировать

выводы о наличии режимов, приближенных к холостого хода.

**Научна новизна.** Установлено, что из-за сложности охвата больших промежутков времени при фиксации данных о параметрах электрической мощности, возникает дилемма относительно объема результирующей информации и ее детализации, во избежание потерь информации предложена процедура, основанная на законе нормального распределения выборки данных, и в длительных процессах снижает объем результирующих данных, подлежащих хранению, с возможностью фиксации существенных отклонений по показателям эксцесса и асимметрии соответствующей выборки.

**Практическая ценность.** Применяя в системе мониторинга при долгосрочном наблюдении за параметрами электрической мощности предложенный метод может значительно уменьшить количество данных при передаче основной информации, уровня мощности и диапазона колебаний, а также, при необходимости, использовать дополнительную информацию об изменениях в интервалах наблюдения, выраженные через эксцесс и асимметрию.

**Ключевые слова:** активная мощность; реактивная мощность; нормальное распределение; эксцесс; асимметрия; математическое ожидание; среднее квадратическое отклонение.

## SUBSYSTEM OF SAMPLE PROCESSING OF ACTIVE AND REACTIVE POWER OF TRANSFORMER SUBSTATION

TODOROV O.V. PhD student, Department of electricity consumption system and power management of the Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi national university, Kremenchuk, Ukraine, e-mail: olehtodorov@gmail.com;

BIALOBRZHEYSKYI O.V. PhD, Department of electricity consumption system and power management of the Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi national university, Kremenchuk, Ukraine, e-mail: seemal@kdu.edu.ua;

REVA I.V. PhD student, Department of electricity consumption system and power management of the Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi national university, Kremenchuk, Ukraine, e-mail: cgdzainer@gmail.com;

BEZZUB M.A. PhD student, Department of electricity consumption system and power management of the Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi national university, Kremenchuk, Ukraine, e-mail: bezzubmax@gmail.com;

**Purpose.** Apply statistical analysis to the volumetric samples of electricity consumption parameters to reduce the amount of network node capacity that will be stored.

**Methodology.** Using the statistical data methods processing in the graphical programming system LabVIEW.

**Findings.** Electricity is one of the energy types, the generation volume, transportation, distribution and use of which is constantly growing. At all these stages, the control of the change rate parameters of electrical energy – power occurs. Power is characterized by certain parameters that are subject to continuous monitoring. The change capacity in the conditions of industrial enterprises has a complex character with certain stochastic components. The need to record detailed information causes an increase in the data amount to be stored. As a result, there is a processing data problem on electric energy volumes and electric power parameters with reduction data volume and informativeness preservation. Based on the statistical normal distribution concept, in the graphical programming environment the data processing subsystem on sampling intervals of active and reactive powers of low voltage section the step-down substation is constructed. Using the indicators of the characteristics of the normal distribution of active and reactive power, the analysis of their semi-daily samples was performed. Selected intervals at which the indicators of normal distribution differ significantly, which allowed to form conclusions about the presence of modes close to idling **Originality.** It is established that due to the difficulty covering long time periods under the fixing condition data on electric power parameters, there is a dilemma regarding the resulting information amount and its detailing, to avoid information loss, a procedure based on the law of normal data sampling is the resulting data to be stored, with the possibility recording significant deviations in terms of excess and sample asymmetry.

**Practical value.** Applying the proposed method in the monitoring system for long-term monitoring electrical power parameters, it is possible to reduce significantly the amount of data during the transmission basic information, power level and range, and, if necessary, use additional information about changes in observation intervals expressed through excess and asymmetry.

**Keywords:** active power; reactive power; normal distribution; excess; asymmetry; mathematical expectation; standard deviation..

## REFERENCES

- [1] Khan, Z. A., Adil, M., Javaid, N., Saqib, M. N., Shafiq, M., & Choi, J. -. (2020). Electricity theft detection using supervised learning techniques on smart meter data. *Sustainability* (Switzerland), 12(19), 1-25. doi:10.3390/su12198023.
- [2] Meyers, B. E., Apostolaki-Iosifidou, E., and Schelhas, L. T., Solar Data Tools: Automatic Solar Data Processing Pipeline. *2020 47th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 2020, pp. 0655-0656, doi: 10.1109/PVSC45281.2020.9300847.
- [3] Todorov, O., Bialobrzheskyi, O., Analysis of automated system structure for controlling and metering the electric energy, primary data collection and processing devices. *Bulletin of Kremenchuk Mykhailo Ostrogradsky National University*, vol. 1, February 2020, Kremenchuk, Ukraine, pp. 145-150. DOI: 10.30929/1995-0519.2020.1.145-150
- [4] Babakmehr, M., Sartipizadeh, H., & Simões, M. G. (2020). Compressive informative sparse representation-based power quality events classification. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 16(2), 909-921. doi:10.1109/TII.2019.2922964
- [5] Huang Zhiwei et al., Transient power quality assessment based on big data analysis. *2014 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*, 2014, pp. 1308-1312, doi: 10.1109/CICED.2014.6991919.
- [6] Bialobrzheskyi, O., Bondarenko, S., & Yakymets, S. (2020). Innovative technique for evaluating electric power distortion in cable transmission line. *Scientific Bulletin of National Mining University*, 2020(1), 58-63. doi:10.33271/nvngu/2020-1/058
- [7] Xiaoqing, H., and Yonghong, H., Data processing technology used in power quality measurement system. *2009 7th International Conference on Information, Communications and Signal Processing (ICICS)*, 2009, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICICS.2009.5397655.
- [8] Romanova, S. V., Khromov, S. V., Application of mathematical statistics methods for predicting occurrence of voltage unbalance in electrical networks. *Bulletin of the South Ural state University*, vol. 17, October 2017, Chelyabinsk, Russia Federation, pp. 59-71.
- [9] Zurkafli, A. Z, N. Zaini and Latip, M. F. A., Personal Energy Auditor based on Energy Consumption Rating using Normal Distribution for Energy Efficiency. *2020 10th IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering (ICCSCE)*, Penang, Malaysia, 2020, pp. 119-124, doi: 10.1109/ICCSCE50387.2020.9204942.
- [10] Burgas, L., Melendez, J., & Colomer, J. (2014). Principal Component Analysis for Monitoring Electrical Consumption of Academic Buildings. *Energy Procedia*, 62, 555–564. doi:10.1016/j.egypro.2014.12.417
- [11] Zhang L., Huang Z., Li Z., Guo K.: Research on the correlation of monthly electricity consumption in different industries: a case study of Bazhou county. *Procedia Comput. Sci.* 139, pp. 496–503 (2018). doi:10.1016/j.procs.2018.10.245
- [12] Anishchenko, V. A., & Pisaruk, T. V. (2020). Monitoring the accuracy of measurements the load of industrial enterprises. *Energetika.Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, vol. 63(5), Minsk, Republic of Belarus, 363-410. doi:10.21122/1029-7448-2020-63-5-393-410
- [13] Zagirnyak, M. V., Prus, V. V., Nikitina, A. V., Grounds for efficiency and prospect of the use of instantaneous power components in electric systems diagnostics. *Przeglad Elektrotechniczny*, vol. 82, no. 12, pp. 123-125, 2006.
- [14] Todorov, O., Bialobrzheskyi, O., & Andrii, S. (2020). Application of IEEE 1459-2010 for the power investigation a traction substation transformer secondary voltage. *Paper presented at the 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology, KhPI Week 2020 - Conference Proceedings*, 199-204. doi:10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250094
- [15] Todorov, O., Bialobrzheskyi, O., & Bondarenko, S. (2020). Virtual complex prototype for metering a three-phase network electric power quantity and quality. *Paper presented at the Proceedings of the 25th IEEE International Conference on Problems of Automated Electric Drive. Theory and Practice, PAEP 2020*, doi:10.1109/PAEP49887.2020.9240845



## МЕТОДИКА ВИБОРУ НОМІНАЛЬНОЇ ПОТУЖНОСТІ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ В УМОВАХ РОЗПОДІЛЬЧИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ НАСЕЛЕНИХ ПУНКТІВ

- ПАПАЙКА Ю.А. д-р техн. наук, доцент, завідувач кафедри електроенергетики Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: Papaika.Yu.A@nmu.one;
- ЛУЦЕНКО І.М. канд. техн. наук, доцент, професор кафедри електроенергетики Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: Lutsenko.I.M@nmu.one;
- КОШЕЛЕНКО Є.В. асистент кафедри електроенергетики Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: Koshelenko.Ye.V@nmu.one;
- ЦИГАН П.С. аспірант кафедри електроенергетики Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: Tsyhan.P.S@nmu.one;

**Мета роботи.** Обґрунтувати методику вибору номінальної потужності силових трансформаторів для підвищення ефективності їх використання в розподільчих електричних мережах міст.

**Методи дослідження.** Аналітична обробка статистичних даних.

**Отримані результати.** У роботі вирішено задачу ефективного використання встановленої потужності трансформаторів, раціонального їх вибору при проектуванні електричних мереж в умовах сьогодення шляхом розробки методики комплексного врахування параметрів режимів роботи типових споживачів міських електричних мереж та їх структури при виборі номінальної потужності живлячих трансформаторів підстанцій 6(10)/0,4 кВ. Встановлено, що вибір трансформаторів за класичними методиками викликає суттєву похибку і завищення номінальної потужності на етапі проектування. Для зниження цієї похибки розроблено методику вибору потужності трансформаторів міських електричних мереж, яка враховує прогнозовані показники режимів роботи обладнання, тип споживачів, навантажувальну здатність обладнання, параметри режиму роботи та оточуючого середовища, постійну часу нагріву існуючих типів трансформаторів, які можуть бути прийняті до встановлення, доцільний рівень компенсації реактивних навантажень.

**Наукова новизна** полягає у розробці методики вибору номінальної потужності силових трансформаторів 6(20)/0,4 кВ міських розподільчих електричних мереж шляхом комплексного врахування параметрів режимів роботи типових споживачів та їх фактичної структури, що дозволить ефективно використовувати трансформаторне обладнання за навантажувальною здатністю протягом регламентованого строку їх експлуатації.

**Практична цінність** отриманих результатів полягає у підвищенні ефективності капітальних та експлуатаційних витрат шляхом вибору раціональної номінальної потужності розподільчих трансформаторів 6(20)/0,4 кВ із забезпеченням ефективного використання їх навантажувальної здатності в умовах електричних мережах міст.

**Ключові слова:** навантажувальна здатність трансформатора; компенсація реактивної потужності; розподільчі мережі.

### І. ВСТУП

Електроенергетична сфера є однією з найважливіших галузей національної економіки. Проблеми, які характерні для електроенергетики – це низька ефективність роботи, викликана експлуатацією морально і фізично застарілого обладнання. Основною проблемою функціонування електричних мереж є збільшені в порівнянні з розвиненими країнами рівні технологічних витрат електроенергії, застарілість основних фондів, неефективне використання обладнання, підвищені експлуатаційні витрати, значна кількість відмов електроустаткування мереж та час ліквідації аномальних режимів. Підвищення ефективності роботи електричних мереж України є пріоритетним напрямком діяльності, а розробка і впровадження відповідних заходів – актуальним завданням. Трансформаторні підстанції є найбільш важливою складовою частиною електричних мереж з точки зору забезпечення надійності електропостачання. Основним і в той же час найбільш капіталоемним електрообладнанням підстанцій є трансформатори, які в силу різних причин використовуються неефективно. Аналіз факторів впливу, встановлення причин неефективного використання трансформаторного обладнання, розробка заходів щодо оптимізації їх експлуатації є досить важливим завданням.

У даній статті вирішена задача підвищення ефективності роботи силових трансформаторів однієї з основних, найбільш репрезентативних ланок ланцюга

розподілу електроенергії – підстанцій міських електричних мереж 6-20/0,4 кВ шляхом розробки адекватної методики вибору їх номінальної потужності з урахуванням характеристик режимів навантаження типових споживачів.

## II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Центральне місце в структурі енергетичних об'єктів, що знаходяться на балансі та в обслуговуванні операторів систем розподілу в населених пунктах займають підстанції 10/0,4 кВ та 6/0,4 кВ та КЛ-6(10) кВ зв'язку між ними.

Питання підвищення ефективності експлуатації силових трансформаторів міських ТП є досить важливим. Основною причиною неефективної експлуатації є завищення номінальної потужності при проектуванні через використання методів розрахунку, які недостатньо адекватно відображають режим роботи устаткування, або взагалі не враховують його. Так, у попередніх дослідженнях за даним напрямом було проаналізовано ефективність експлуатації трансформаторів районних підстанцій високовольтних електричних мереж напругою 110-220 кВ [1], розподільчих трансформаторів 6(10)/0,4 кВ [2]. В цих дослідженнях встановлено та доведено, що проблема неадекватно завищеної потужності існує, а вирішувати її необхідно, перш за все, на етапі проектування шляхом максимально можливого врахування поправкових коефіцієнтів та параметрів режимів роботи електричних мереж, технічних заходів і рішень щодо зниження розрахункового максимуму з одночасним задоволенням параметрів мережі за пропускну здатністю.

Безперечно, впровадження моніторингу режимів роботи трансформаторів, як це запропоновано у роботах [1]-[2], сприятиме інформатизації режимів експлуатації силових трансформаторів та оцінці відпрацювання їх ресурсу. Проте доцільно визначити загальні критерії та розробити конкретні заходи щодо підвищення ефективності використання трансформаторів, що дозволить отримати уточнену методика розрахунку вибору їх потужності, а не обмежуватися загальними висновками про наявний ресурс за навантажувальною здатністю. Головна задача – це ефективно використання навантажувальної здатності та перехід до експлуатації електрообладнання у відповідності до паспортних параметрів та регламентованого строку служби.

## III. МЕТА РОБОТИ

Обґрунтувати методику вибору номінальної потужності силових трансформаторів для підвищення ефективності їх використання в розподільчих електричних мережах міст.

## IV. ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

У порівнянні з системоутворюючими електричними мережами розподільчі мережі в більшій мірі

потребують реконструкції, модернізації та оптимізації розвитку в зв'язку з великим фізичним і моральним зносом. До інноваційних заходів, техніки і технологій підвищення енергетичної ефективності в розподільчих електричних мережах слід віднести наступні розробку і впровадження нового, більш економічного, електрообладнання, зокрема, силових трансформаторів зі зменшеними активними і реактивними втратами холостого ходу.

Аналіз «вузьких» місць в мережах 6-20/0,4 кВ дозволяє запропонувати заходи щодо вдосконалення їх функціонування, для чого необхідно розробити адекватну методику вибору номінальної, ефективної з позицій максимального використання навантажувальної здатності, потужності трансформаторів з урахуванням максимально можливого спектру факторів та параметрів режимів їх роботи.

Аналіз існуючих причин встановлення завищеної потужності трансформаторного устаткування. Основною причиною завищення типорозмірної структури парку трансформаторного устаткування є недосконалість методів розрахунку електричних навантажень для визначення розрахункового максимуму, який, як правило, приймається 30-хвилинним, що призводить до суттєвого недовантаження обладнання у випадку нерівномірного графіка електричних навантажень, що характерно для режимів роботи споживачів міських електричних мереж.

Розрахунок електричних навантажень – це вихідний момент при створенні СЕП будь-якого об'єкта. Вони визначають розмір капіталовкладень і експлуатаційні показники СЕП. Електричні навантаження є вихідними даними для вирішення комплексу технічних і економічних питань, що виникають при проектуванні електропостачання об'єктів. Визначення електричних навантажень є першим етапом проектування будь-якої системи електропостачання і виконується з метою вибору і перевірки струмоведучих елементів і трансформаторів по нагріванню, розрахунку відхилень і коливань напруги, вибору захисних пристроїв і т. д. Від правильної оцінки очікуваних електричних навантажень залежить раціональність вибору схеми і всіх елементів системи електропостачання та її техніко-економічні показники (капітальні вкладення, щорічні експлуатаційні витрати, витрати кольорового металу і втрат електроенергії).

Більшість мереж, які зараз експлуатуються, спроектовані шляхом розрахунку електричних навантажень за методами: коефіцієнта попиту, упорядкованих діаграм [3], методом питомих навантажень, які мають свої недоліки, основним з яких є завищення розрахункової потужності та відсутність врахування фактичного режиму роботи обладнання. Протягом останнього десятиріччя поширення щодо використання набув статистичний модифікований метод (метод розрахункових коефіцієнтів). Проте, всі ці методи найбільш придатні для розрахунку навантажень потужних вузлів (цехів, ГЗП, РП та інші промислові об'єкти). Перевагою та основною відмінністю методу

розрахункових коефіцієнтів є те, що в ньому врахована ієрархічна побудова систем електропостачання за рівнями розподілу електроенергії, а розрахункові коефіцієнти для визначення максимальних навантажень залежать від постійної часу нагрівання елементів мереж, яка збільшується зі зростанням рівня розподілу, причому для трансформаторного вибору трансформаторного обладнання, магістральних шинопроводів, головних розподільчих щитів постійна часу  $T$  становить 150 хв або 2,5 год, що дозволяє отримати значення розрахункового коефіцієнта менше 1, а це в свою чергу понижує значення розрахункового максимуму і відповідно зменшити номінальні параметри основного електрообладнання та капіталовкладення в СЕП. Недоліком методу є його використання у більшості випадків для проектування промислових підприємств [4]. Ця особливість є визначальною і має бути врахована при проектуванні систем електропостачання і виборі електрообладнання міських електричних мереж.

Розрахунок електричних навантажень міських електричних мереж 0,4-10 кВ. Вихідними даними для розрахунку електричних навантажень на шинах підстанції для вибору лінії живлення 0,4 кВ є характеристики і тип споживачів. Розрахунок електричних навантажень виконується відповідно до нормативного документа ДБН В 2.5-23-2010 [5] за питомими показниками електричних навантажень типових струмоприймачів міських електричних мереж.

*Навантаження на шини 0,4 кВ ТП.* Для розрахунків громадських будівель і цивільних споруд використовують такий показник як питома навантаження, який визначений для споживача конкретного типу в залежності від його характеристики.

Розрахункове активне навантаження  $P_p$  об'єкта при цьому визначається з виразу:

$$P_p = P_{num} \cdot N,$$

де  $P_{num}$  – питома навантаження, кВт/показник;

$N$  – кількість показників.

Недоліком методу є недостатнє врахування реального режиму роботи струмоприймачів (ГЕН) і вибір устаткування ТП (силових трансформаторів) за розрахунковим максимумом без урахування постійних часу нагрівання елементів. Перевагою є адекватне застосування для розрахунку міських електричних мереж.

Оцінюючи методи в цілому, необхідно зробити наступні висновки:

1. При розрахунку електричних навантажень використовується два підходи: емпіричний – реалізований в методах коефіцієнта попиту і статистичний в поєднанні з елементами моделювання – в інших розглянутих методах.

2. Ні метод коефіцієнта попиту, ні статистичні моделі, крім при використанні достовірних, попередньо визначених з експерименту, вихідних даних, не забезпечують отримання результатів з нормативною ( $\delta = \pm 10\%$ ) похибкою.

3. Статистичні моделі для визначення розрахункових електричних навантажень доцільно застосовувати в тих умовах, які послужили базою для їх розробки.

4. Основними причинами, що призводять до значних похибок у розрахунках електричних навантажень, слід вважати порушення області застосування розроблених моделей, низьку достовірність, а в ряді випадків і невизначеність вихідних даних, у тому числі внаслідок їх «старіння», відсутність врахування зв'язку параметрів моделей і розрахункових коефіцієнтів з організаційними експлуатаційними факторами, типовими характеристиками об'єктів.

Викладене вказує на те, що необхідні більш глибокі дослідження, щоб зрозуміти явище тотального завищення розрахункового максимуму, а також розробка, на основі цих знань, напрямків і заходів з вдосконалення методів їх розрахунку і механізму підвищення ефективності систем електропостачання на різних етапах створення та функціонування СЕП – від науково-дослідної роботи до проектування і експлуатації.

Аналіз режимів електроспоживання типових споживачів міст. Для обґрунтування деяких важливих параметрів, які стосуються розроблюваної методики вибору трансформаторів в міських електричних мережах, слід виконати аналіз графіків електричного навантаження (ГЕН) типових міських об'єктів. За ГЕН типових споживачів (рис. 1) у разі їх живлення від окремої ТП можна визначити доцільну потужність трансформаторів ТП, їх кількість з позицій ефективного використання.

У разі живлення від окремої ТП різних за характером, або декілька споживачів району доцільно скористатися наступними типовими ГЕН (рис. 2), у яких враховано прив'язку до найпотужнішого об'єкту.

Згідно даних щодо типових графіків електричних навантажень об'єктів міських електричних мереж та розрахованих коефіцієнтів нерівномірності можна зробити висновки, що маневрена частина ГЕН малопотужних комунально-побутових споживачів є більш яскраво вираженою, порівняно з ГЕН енергосистеми, оскільки переважна більшість таких споживачів не використовує механізм диференційованої системи тарифікації плати за користування електричною енергією. Це спричиняє суттєвий нічний провал електроспоживання порівняно, зокрема, з ранковим та вечірнім піками. Відношення мінімального (базового) навантаження до максимального (пікового) коливається в діапазоні 60-90 % для окремих видів споживачів та складає 75% - на рівні живлячих підстанцій району з житловими будинками з електроплитами, 85 % - на рівні живлячих підстанцій району з житловими будинками з газовими плитами.

Як правило, електричні навантаження на рівні підстанцій формує група струмоприймачів, найбільш потужними з яких є багатопверхові будинки з газовими або електричними плитами. Типові ГЕН примі-

ських мереж з приватними будинками можна прийняти аналогічними, залежно від виду електрифікації об'єктів, що підключаються до ТП, або з урахуванням їх газифікації.

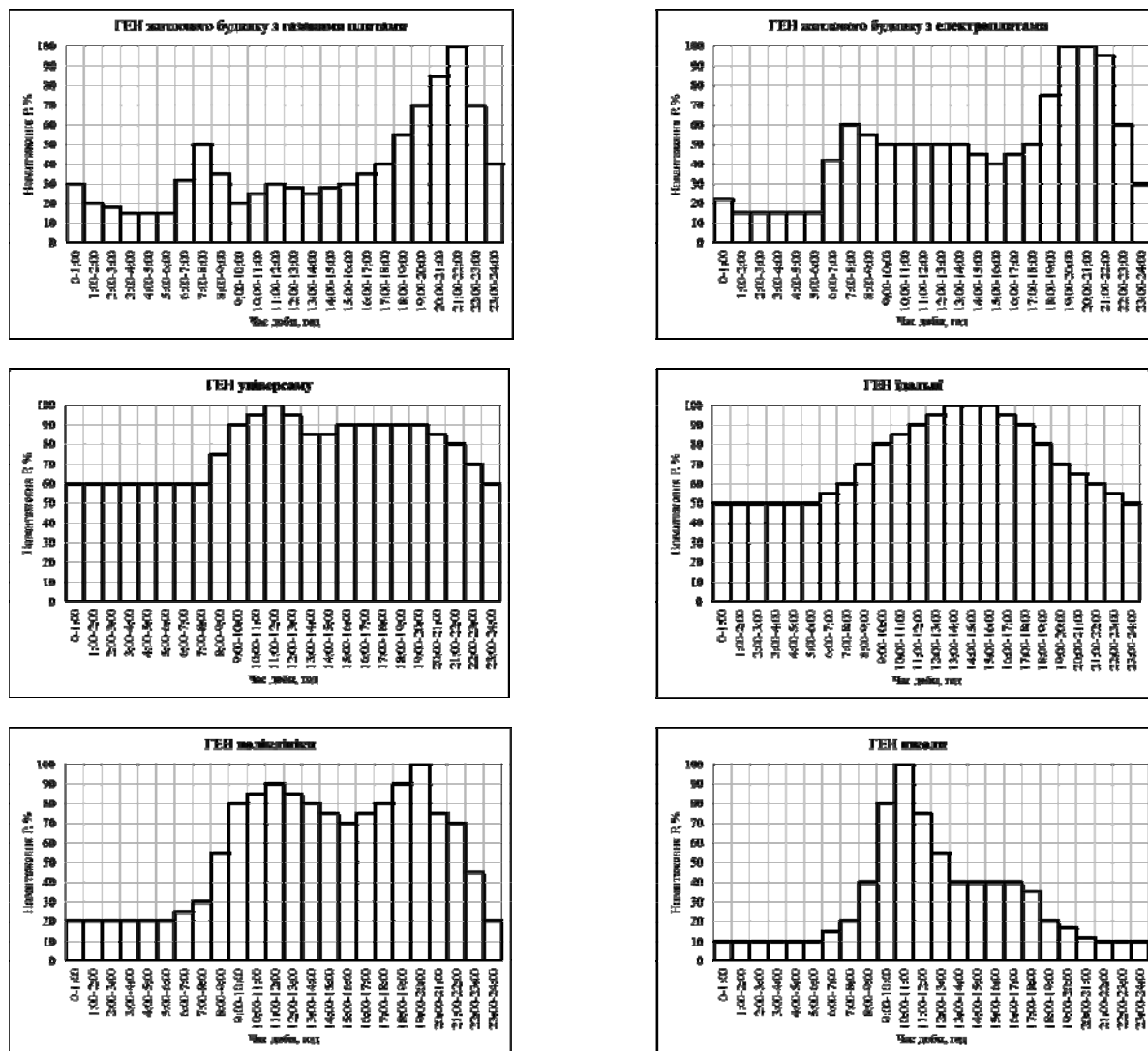


Рисунок 1. ГЕН типових споживачів міських електричних мереж

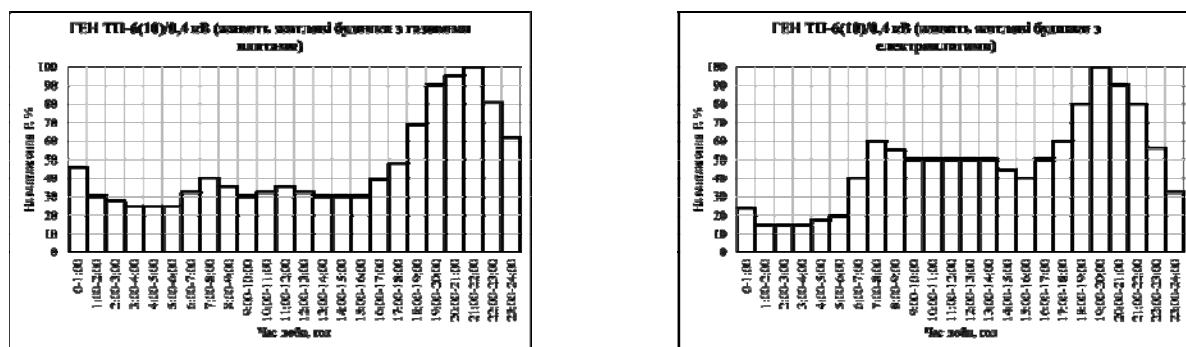


Рисунок 2. ГЕН ТП-6(10)/0,4, що живить житлові будинки з газовими та електричними плитами

Таблиця 1. Коефіцієнти типових графіків електричного навантаження об'єктів міста

Об'єкт	Коефіцієнт нерівномірності, $K_{нр}$	$T_m$ , год	$P_c$ , в.о.	$P_{ск}$ , в.о.	$K_{з.г.}$	$K_{ф}$	$\cos \phi$
Житловий будинок із газовими плитами	0,15	3325,7	0,380	0,440	0,3796	1,16	0,92
Житловий будинок з електроплитами	0,15	4176,1	0,477	0,539	0,4767	1,13	0,93
Універсам	0,6	6754,7	0,771	0,784	0,7708	1,02	0,85
Їдальня	0,5	6206,8	0,708	0,733	0,7083	1,04	0,95
Поліклініка	0,2	4928,2	0,563	0,632	0,5625	1,12	0,92
Школа	0,1	2624,7	0,300	0,391	0,2996	1,30	0,9
ТП-10/0,4, (живить житлові будинки з газовими плитами)	0,25	3975,8	0,454	0,510	0,4538	1,12	0,9
ТП-10/0,4, (живить житлові будинки з електроплитами)	0,15	4179,8	0,477	0,530	0,4771	1,11	0,91

Аналіз факторів впливу на вибір потужності трансформаторів. Номінальна потужність силових трансформаторів може бути знайдена за розрахунковою (методи розрахунку електричних навантажень), або, виходячи з максимальної за ГЕН за наступною відомою формулою:

$$S_{нт} \geq S_{розр} = \frac{S_M}{(n-1)k_{ав}}$$

де  $k_{ав}$  - коефіцієнт допустимого аварійного навантаження (приймається 1,4 для масляних трансформаторів);  
 $n$  - число трансформаторів на підстанції.

Рекомендований ГОСТ 14209-69 (раніше) і ПУЕ дотепер  $k_{ав} = 1,4$  однозначно визначає для двохтрансформаторних підстанцій вибір потужності трансформаторів не менше як на 0,65-0,70 розрахункової потужності.

В той же час  $k_{ав} = 1,4$  - це граничне допустиме перевантаження при умовах, що  $k_{з.г.} \leq 0,75$ ,  $t_m = 6$  год протягом інтервалу часу не більше 5 діб (згідно ПУЕ).

З іншої сторони, для ряду дрібних (до 5 МВт) підприємств і виробництв аграрного й комунального сектору тривалість добового максимуму може складати менше 6 год (2-4 год). У цих випадках трансформатори можуть перевантажуватися більше, ніж на 40 % ( $k_{ав} > 1,4$ ) без прискореного скорочення строку служби.

Неврахування наведених вище обставин може призвести до неефективного використання потужності встановлених трансформаторів через закладення надмірного запасу.

З приведеної формули можна зробити висновок, що для багатотрансформаторних підстанцій ( $n > 2$ ) можна збільшити їх завантаження у вихідному режимі, оскільки навантаження післяаварійного режиму будуть забезпечувати два і більше трансформатори [6].

Слід зауважити, що вибір трансформаторів за максимальним розрахунковим навантаженням, навіть реальним (за ГЕН), вносить деяке завищення потужності, яке доцільно додатково враховувати коефіцієнтом запасу  $K_{зап.}$ , який можна представити як відношення «гріючої» потужності до максимальної. Під «гріючою» потужністю розуміється середньоквадратичне значення повної потужності [6]:

$$K_{зап.} \leq \frac{K_{ф.с}}{K_{м.с}} = \frac{S_{ср.кв}}{S_{макс.ГЕН}} < 1$$

Згідно наведеного виразу коефіцієнт запасу для типових споживачів чи їх сукупностей міських електричних мереж, знайдений за показниками фактичних графіків електричних навантажень згідно даних таблиці 1, буде наступним (див. табл. 2).

**Таблиця 2.** Коефіцієнти запасу за розрахунковою потужністю

Об'єкт	Коефіцієнт запасу, $K_{\text{зап.S}}$
Житловий будинок із газовими плитами	0,440
Житловий будинок з електроплитами	0,539
Універсам	0,784
Їдальня	0,733
Поліклініка	0,632
Школа	0,391
ТП-10/0,4, (живить житлові будинки з газовими плитами)	0,510
ТП-10/0,4, (живить житлові будинки з електроплитами)	0,530

При цьому доцільно внести деяке коригування даного коефіцієнту при виборі трансформаторів з урахуванням постійної часу їх нагрівання, який може складати від 2,5 год, згідно ГОСТ 14209-97 (масляні трансформатори); та 1,5 год згідно ДСТУ-2767-94 (сухі трансформатори).

За умови  $T_{\text{мт}} = 150$  хв, осереднення ГЕН споживачів необхідно виконувати для часу, що дорівнює  $3T_{\text{мт}} = 450$  хв (7,5 год) – для масляних трансформаторів.

Для сухих трансформаторів аналогічно за умови  $T_{\text{ст}} = 90$  хв, осереднення ГЕН споживачів необхідно

виконувати для часу, що дорівнює  $3T_{\text{мс}} = 270$  хв (4,5 год).

Таким чином, застосування масляних трансформаторів дозволяє виконати осереднення ГЕН за більший проміжок часу, що досягається кращою системою охолодження, порівняно з сухими.

Для оцінки кількісного впливу системи охолодження трансформатора виконаємо відповідні розрахунки для типових ГЕН з оцінкою коефіцієнта запасу із забезпеченням надійної роботи трансформаторів, без надмірних перевантажень.

**Таблиця 3.** Уточнені коефіцієнти запасу залежно від типу трансформаторів

Об'єкт	Добовий ГЕН	Масляні трансформатори	Сухі трансформатори
	Коефіцієнт запасу, $K_{\text{зап.S}}$	Коефіцієнт запасу, $K_{\text{зап.мт}}$	Коефіцієнт запасу, $K_{\text{зап.ст}}$
Житловий будинок із газовими плитами	0,440	0,678	0,817
Житловий будинок з електроплитами	0,539	0,769	0,922
Універсам	0,784	0,944	0,982
Їдальня	0,733	0,976	1,033
Поліклініка	0,632	0,851	0,891
Школа	0,391	0,648	0,770
ТП-10/0,4, (живить житлові будинки з газовими плитами)	0,510	0,784	0,924
ТП-10/0,4, (живить житлові будинки з електроплитами)	0,530	0,746	0,876

Додатково уникнути завищення потужності трансформаторів і одночасно підвищити їх завантаження до  $K_{\text{з.доц}}$  можливо шляхом компенсації реактивних навантажень споживачів на шинах 6-10 кВ [6].

Коефіцієнти потужності типових споживачів мі-

ських електромереж знаходяться в діапазоні  $\cos\varphi = 0,9-0,98$ , залежно від об'єкту, що розглядається або переважає в сукупному навантаженні.

Режими роботи та умови використання навантажувальної здатності трансформаторів. З метою усу-

нення протиріччя щодо вибору силових трансформаторів у новому стандарті (ГОСТ 14209-97, ДСТУ-2767-94) наводяться рекомендації щодо тривалих аварійних перевантажень трансформаторів 3-х класів, з системами охолодження 4-х категорій у відповідному режимі роботи в залежності від:  $\theta_a$ ,  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $t_m$ ,

де  $\theta_a$  – температура оточуючого середовища (повітря), °С;

$K_1$  – коефіцієнт попереднього завантаження трансформатора;

$K_2$  – коефіцієнт перевантаження трансформатора;

$t_m$  – проміжок часу перевантаження трансформатора значенням  $K_2$ .

Положення, наведені у Стандарті [7], можливо використовувати:

а) на етапі вибору потужності силових трансформаторів, якщо заздалегідь відомий добовий режим роботи навантаження (ГЕН) або його показники (середнє та максимальне навантаження та його тривалість);

б) у процесі експлуатації – для коригування рівня навантаження або рекомендації застосування доцільного типорозміру трансформатора (фактичний ГЕН – відомий)

В теперішній час в міських електричних мережах застосовуються переважно розподільчі трансформатори з  $S_{T.ном} \leq 2500$  кВ·А.

Для трансформаторів усіх типів важливою характеристикою є навантажувальна здатність, яка визначається властивостями ізоляції обмоток і охолоджуючого середовища. Навантажувальна здатність – це сукупність допустимих навантажень і перевантажень трансформатора у процесі експлуатації, при яких не відбувається прискореного скорочення строку його служби.

При навантаженні, що перевищує номінальне, рекомендується не перевищувати граничні значення, наведені в таблиці 1 [7].

Однотрансформаторні підстанції. Визначальним у даному випадку є нормальний режим систематичних навантажень (режим з номінальним строком служби трансформатора). Вибір технічно доцільної потужності двохобмоткового трансформатора здійснюється за формулою :

$$S_{T.ном} \geq S_m \cdot$$

Використання співвідношення забезпечує деякий запас, який обумовлений трьома причинами:

1) дискретністю шкали номінальних потужностей трансформаторів;

2) неврахуванням конфігурації графіку навантажень на добовому (сезонному, річному ) розрізі;

3) неврахування постійної часу нагрівання трансформатора.

4) неврахуванням різниці між фактичною температурою охолоджуючого середовища у місці установки трансформатора й температурою нормованою ГОСТ 11677-65 для масляних трансформаторів, яка дорівнює

20 °С;

5) неврахування коефіцієнту потужності характерної сукупності споживачів.

Тому, з метою більш ефективного використання потужності трансформаторів ГОСТ 14209-97 пропонує використовувати коефіцієнт допустимого систематичного навантаження  $K_2$ .

$$S_{T.ном} \geq S_m / K_2 \cdot$$

Реальний графік навантаження слід перетворити у еквівалентний за нагрівом, тобто зносом ізоляції, двоступінчатий відповідно до [7].

За отриманими даними можливо встановити можливість режиму роботи трансформатора певного типорозміру та остаточно рекомендувати прийняти його номінальну потужність.

Методика вибору ефективної потужності силових трансформаторів в міських електричних мережах. Основою для вибору і побудови системи електропостачання служать розрахункові електричні навантаження струмоприймачів. Саме вони визначають рівень капітальних і експлуатаційних витрат і ефективність проєктованих та споруджуваних електроустановок. Неприпустимо як завищення, так і заниження розрахункових величин. При завищенні – збільшуються витрати в СЕП, заниження – може призвести до виходу з ладу елементів СЕП, аварійних перерв у електропостачанні і збитку.

Розробка нової методики, яка б забезпечила економічно доцільні границі по точності визначення розрахункових електричних навантажень, – досить ризикозна і складна науково-технічна задача. На це вказує хоча б той факт, що, незважаючи на численні дослідження, досягнуті в цьому напрямку результати по зниженню похибки розрахункових методів, залишаються досить скромними.

Значних матеріальних ресурсів на вирішення цих проблем немає. Проте вже сьогодні в рамках відомих підходів і нових знань про механізм впливу похибки на техніко-економічні показники СЕП, можна сформулювати вимоги до більш досконалої методики, її змісту і можливостей, в тому числі щодо похибки.

Основних вимог до методики декілька:

1. Методика повинна забезпечити визначення розрахункових електричних навантажень для вибору та перевірки трансформаторів, по нагріванню і економічним критеріям.

2. Моделі для визначення електричних навантажень повинні розроблятися, виходячи з можливості отримання достовірної вхідної інформації стосовно проєктованих об'єктів, а також необхідної точності кінцевих результатів.

3. З метою досягнення найбільшої точності кінцевих результатів необхідно, щоб розрахунок електричних навантажень ґрунтувався на тих вихідних параметрах електроустановок і процесів, які відповідають шуканому ступеню розподілу електроенергії.

4. Врахування особливостей характеристик ти-

пових споживачів міських електричних мереж повинно виконуватися на рівні отримання коефіцієнтів моделей. При цьому коефіцієнти моделей повинні відносно легко уточнюватися в міру зміни режиму роботи, складу або характеру навантаження споживачів.

5. Розрахунки за методикою повинні ґрунтуватися на єдиній із завданнями ресурсозбереження та ефективного використання елементів СЕП бази даних. Вихідні дані, що забезпечують надійність роботи системи електропостачання, повинні систематично уточнюватися.

Аналіз методів розрахунку електричних навантажень, досвід їх розробки і застосування переконує, що для вдосконалення галузевої методики найбільш прийнятним є поєднання методу, який ґрунтується на питомій нормі навантаження у поєднанні з моделюванням та урахуванням технічних характеристик і номінальної граничної здатності обладнання, що вибирається для та обліку індивідуальних характеристик споживачів.

При цьому передбачається, що такий підхід забезпечить не тільки більшу точність, а й багатоцілкове використання цих даних для вирішення різних електроенергетичних завдань, як, наприклад, підвищення ефективності використання трансформаторів за номінальною потужністю.

Таким чином запропонована методика реалізується за наступним алгоритмом:

1. Визначення розрахункової активної, реактивної та повної потужності на шинах 0,4 кВ ТП згідно ДБН В 2.5-23-2010 [5].

- за питомими показниками електричних навантажень типових струмоприймачів міських електричних мереж розрахункове активне навантаження  $P_p$  об'єкта при цьому визначається:

$$P_p = P_{\text{пит}} \cdot N,$$

де  $P_{\text{пит}}$  – питоме навантаження, кВт/показник;  
 $N$  – кількість показників.

Розрахункове навантаження житлового будинку в цілому (від жител, силових електроприймачів та вбудованих чи прибудованих приміщень) за умови, коли найбільшою складовою є навантаження від жител,  $P_{\text{бюд.жс}}$  визначають за формулою 12 [5]:

$$P_{\text{бюд.жс}} = P_{\text{жс}} + 0,9P_{\text{сил}} + \sum_{i=1}^n P_{\text{сп}} \cdot K_{\text{уч}}$$

де  $P_{\text{жс}}$  – розрахункове навантаження електроприймачів жител (квартир), кВт;

$P_{\text{сил}}$  – розрахункове навантаження силових електроприймачів житлового будинку, кВт;

$P_{\text{сп1}} \dots P_{\text{спn}}$  – розрахункові навантаження вбудованих чи прибудованих громадських приміщень, кВт, що живляться від електрощитової житлового будинку (визначаються за методикою, викладеною в підрозділі "Навантаження громадських будинків (приміщень) та

споруд, адміністративних і побутових будинків (приміщень) промислових підприємств");

$K_{\text{уч1}} \dots K_{\text{учn}}$  – коефіцієнти участі в максимумі навантаження квартир і силових електроприймачів житлового будинку, навантажень вбудованих і прибудованих приміщень, що визначаються за таблицею 3.14 [5].

2. Моделювання ГЕН типового споживача або їх сукупності. За даними типових ГЕН споживачів виконується моделювання ГЕН, адекватного до відтворення в умовах, що розглядаються (рис. 1,2).

3. Перерахунок максимальної потужності за відтвореним ГЕН та знаходження розрахункової раціональної потужності з урахуванням коефіцієнта запасу залежно від типу трансформатора (масляний, сухий) та характеристики споживачів.

$$S_{\text{розрац}} = S_{\text{макс.ГЕН}} K_{\text{зап.іТ}}$$

де  $K_{\text{зап.іТ}}$  - знаходиться за таблицею 2 залежно від типу споживача та системи охолодження трансформатора

4. Визначення кількості трансформаторів підстанції з урахуванням резервування живлення споживачів:

- однотрансформаторна  $n = 1$ ;
- багатотрансформаторна  $n > 2$ ;

4.1. Для багатотрансформаторних підстанцій виконується розподіл споживачів за секціями шин і повторюється розрахунок за пунктами 1, 2, 3 з отриманням ГЕН індивідуального трансформатора.

5. Визначення коефіцієнту допустимого тривалого навантаження з урахуванням температури оточуючого середовища  $K_{24}$  для введення поправки на неї відповідно до ГОСТ 14209-97, ГОСТ 30221-97.

6. Попередньо приймається мінімальний типорозмір трансформатора за показниками індивідуальних ГЕН, виходячи з наступних міркувань: номінальна потужність одиночного трансформатора повинна бути не меншою раціонального активного навантаження (реактивне навантаження може бути компенсовано повністю або на доцільному рівні) з урахуванням температурного коефіцієнту тривалої роботи обладнання  $K_{24}$ . Розрахунок проводиться до моменту задоволення прийнятого типорозміру перевіркам роботи обладнання у нормальному (для однотрансформаторних ТП) та післяаварійному режимах роботи (для багатотрансформаторних ТП).

$$S_{\text{ном.т}} \geq \frac{S_{\text{розрац.інд}} \cos \varphi}{K_{24}} \geq \frac{P_{\text{розрац.інд}}}{K_{24}}$$

6.1. Перевірка №1. Нормальний режим систематичних навантажень (для всіх ТП). Виконується моделювання двоступінчатого ГЕН нормального режиму з урахуванням тривалості максимумів протягом доби з визначенням коефіцієнту допустимого систематичного перевантаження в нормальному режимі роботи  $K_{2\text{норм}}$ .

6.2. Перевірка №2. Режим тривалих аварійних



перевантажень (для багатотрансформаторних ТП). Виконується моделювання двоступінчатого ГЕН післяварійного режиму з визначенням коефіцієнту допустимого перевантаження у післяварійному режимі роботи  $K_{2ав}$ , оцінюється температура найбільш нагрітої точки обмотки трансформатора та фізичний знос.

7. Техніко-економічне обґрунтування доцільного типорозміру трансформатора з певною системою охолодження шляхом порівняння капіталовкладень на реалізацію проекту.

Аналіз потенційного економічного ефекту від реалізації розробленої методики розрахунку і вибору потужності трансформаторів доцільно виконати для випадку застосування трансформаторів суміжних типорозмірів [6].

### V. ВИСНОВКИ

Силові трансформатори 6(10) кВ ТП міських електричних мереж є однією з основних ланок ланцюга розподілу електроенергії, надійність роботи якої безпосередньо пов'язана з безперебійністю електропостачання споживачів, а ефективна робота трансформаторів ТП забезпечує своєчасність їх заміни більш прогресивними зразками, максимально раціональні капіталовкладення в мережу, енерго- та ресурсозбереження.

У роботі вирішено задачу ефективного використання встановленої потужності трансформаторів, раціонального їх вибору при проектуванні електричних мереж в умовах сьогодення шляхом розробки методики комплексного врахування параметрів режимів роботи типових споживачів міських електричних мереж та їх структури при виборі номінальної потужності живлячих трансформаторів підстанцій 6(10)/0,4 кВ.

Встановлено, що вибір трансформаторів за класичними методиками викликає суттєву похибку і завищення номінальної потужності на етапі проектування. Для зниження цієї похибки розроблено методику вибору потужності трансформаторів міських електричних мереж, яка враховує прогнозовані показники режимів роботи обладнання, тип споживачів, навантажувальну здатність обладнання, параметри режиму роботи та оточуючого середовища, постійну часу нагріву існуючих типів трансформаторів, які можуть бути прийняті до встановлення, доцільний рівень компенсації реактивних навантажень.

Результати роботи можуть бути використані проектними організаціями при виконанні техніко-економічних обґрунтувань рішень.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Луценко І.М. Обґрунтування доцільності переходу до системи обслуговування силових трансформаторів за поточним технічним станом / І.М. Луценко, В.Б. Калініков // Матеріали міжнародної конференції «Форум гірників - 2011» – 2011. – Т. 4. – С. 75–79.
- [2] Заїка В. Т. Навантажувальна здатність трансформаторів розподільних мереж селищ міського типу / В.Т. Заїка, С.С. Котенко, І.М. Луценко // Науковий вісник Національного гірничого університету – 2010. – Вип. №6. – С. 86–91.
- [3] Справочник по электроснабжению промышленных предприятий: в 2 Т. / Под общей редакцией А.А. Федорова. – М.: Энергоатомиздат, 1973. [Розд. 24].
- [4] ДСТУ-Н Б В.2.5-80:2015. Настанова з проектування систем електропостачання промислових підприємств. – Введ. 2016-01-07. – 79 с.
- [5] Державні будівельні норми України, Проектування електрообладнання об'єктів цивільного призначення. ДБН В.2.5-23:2010 Київ, Міністерство регіонального розвитку та будівництва України 2010. – 102 с.
- [6] І.М. Луценко, Є.В. Кошеленко, П.С. Циган. Підвищення точності вибору та ефективності використання силових трансформаторів розподільчих мереж // Вісник КрНУ. – Кременчук: 2017. – Вип. 5/2017 (106).
- [7] ДСТУ 3463-96. Керівництво з навантаження силових масляних трансформаторів. – Введ. 1999-01-01. – 101 с.
- [8] ДСТУ 2767-94. Керівництво з навантаження силових сухих трансформаторів. – Введ. 1999-01-01. – 75 с.
- [9] Папаїка Ю.А., Півняк Г.Г., Жежеленко І.В. Енергетична ефективність систем електропостачання. – Д.: НТУ «ДП», 2018. – 149 с.
- [10] Папаїка Ю.А. Методика определения номинальной мощности цеховых трансформаторов при наличии электроприемников с нелинейной вольт-амперной характеристикой / Ю.А. Папаїка, А.Г. Лысенко // Гірнична електромеханіка та автоматика. – 2012. – № 88. – С. 28-33.
- [11] Баланс энергий в силовых цепях / В.Е. Тонкаль, А.В. Новосельцев, С.П. Денисюк и др. – К.: Наукова думка, 1992. – 312 с.
- [12] Ущатовський К.В. Прогнози розвитку електроенергетики України: оцінка надійності та достовірності / К.В. Ущатовський // Енергосбереження. Енергетика. Енергоаудит. – 2015. - №7. С. 14-23.
- [13] Жежеленко И.В. Комплексный подход к проблеме повышения энергетической эффективности электрических сетей / И.В. Жежеленко, Г.Г. Трофимов, В.Э. Воротницкий, В.А. Исаев // Энергетика, 2017. - №2 (610). – с.14-16.
- [14] Папаїка Ю.А. Оцінка енергетичної ефективності систем електропостачання за допомогою індексу надійності / І.В. Жежеленко, Ю.А. Папаїка, О.Г. Лисенко // Гірнична електромеханіка та автоматика. – 2018. – № 100. – С. 25-30.
- [15] Коцур І., Гуразда А., Доля Б., Шестов Л., Енер-

гофективный электропривід вентиляційних установок. // Електротехніка та електроенергетика. - 2020. - №1. - С.18-25.  
<https://doi.org/10.15588/1607-6761-2021-1-2>

[16] Папайка, Ю., Лисенко, О., Бубликов, А., & Олішевський, І. (2021). Проблеми

електромагнітної сумісності потужних енергооб'єднань при масовому приєднанні відновлювальних джерел енергії. Електротехніка та електроенергетика, (1), 34–45.  
<https://doi.org/10.15588/1607-6761-2021-1-4>

Стаття надійшла до редакції 18.05.2021

## МЕТОДИКА ВЫБОРА НОМИНАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ В УСЛОВИЯХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ

ПАПАЙКА Ю.А.

д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой электроэнергетики Национального технического университета «Днепропетровская политехника», Днепр, Украина, e-mail: Papaika.Yu.A@nmu.one;

ЛУЦЕНКО И.Н.

канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры электроэнергетики Национального технического университета «Днепропетровская политехника», Днепр, Украина, e-mail: Lutsenko.I.M@nmu.one;

КОШЕЛЕНКО Е.В.

ассистент кафедры электроэнергетики Национального технического университета «Днепропетровская политехника», Днепр, Украина, e-mail: Koshelenko.Ye.V@nmu.one;

ЦЫГАН П.С.

аспирант кафедры электроэнергетики Национального технического университета «Днепропетровская политехника», Днепр, Украина, e-mail: Tsyhan.P.S@nmu.one;

**Цель работы.** Обосновать методику выбора номинальной мощности силовых трансформаторов для повышения эффективности их использования в распределительных электрических сетях городов.

**Методы исследования.** Аналитическая обработка статистических данных.

**Полученные результаты.** В работе решена задача эффективного использования установленной мощности трансформаторов, рационального их выбора при проектировании электрических сетей в существующих условиях путем разработки методики комплексного учета параметров режимов работы типовых потребителей городских электрических сетей и их структуры при выборе номинальной мощности питающих трансформаторных подстанций 6(10)/0,4 кВ. Установлено, что выбор трансформаторов по классическим методикам вызывает существенную погрешность и завышение номинальной мощности на этапе проектирования. Для снижения этой погрешности разработана методика выбора мощности трансформаторов городских электрических сетей, которая учитывает прогнозируемые показатели режимов работы оборудования, тип потребителей, нагрузочную способность оборудования, параметры режима работы и окружающей среды, постоянную времени нагрева существующих типов трансформаторов, которые могут быть приняты к установке, целесообразный уровень компенсации реактивной нагрузки.

**Научная новизна** состоит в разработке методики выбора номинальной мощности силовых трансформаторов 6(20)/0,4 кВ городских распределительных сетей путем комплексного учета параметров режимов работы типовых потребителей и их фактической структуры, что позволит эффективно использовать трансформаторное оборудование по нагрузочной способности на протяжении регламентированного срока его эксплуатации.

**Практическая ценность** полученных результатов состоит в повышении эффективности капитальных и эксплуатационных затрат путем выбора рациональной номинальной мощности распределительных трансформаторов 6(20)/0,4 кВ с обеспечением эффективного использования их нагрузочной способности в условиях электрических сетей городов.

**Ключевые слова:** нагрузочная способность трансформатора; компенсация реактивной мощности; распределительные сети.

## METHODOLOGY FOR SELECTING THE RATED PARAMETERS OF POWER TRANSFORMERS IN THE CONDITIONS OF DISTRIBUTION ELECTRICAL NETWORKS OF SETTLEMENTS

PAPAİKA YU.A.

Sci.D, Professor, Head of the Department of Power Engineering, Dnipro University of technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: papaika@ukr.net;

LUTSENKO I.M.

PhD, Professor of the Department of Power Engineering, Dnipro University of technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: e-mail: Lutsenko.I.M@nmu.one;

KOSHELENKO I.E.V. Assistant of the Department of Power Engineering, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: Koshelenko.Ye.V@nmu.one;

TSYHAN P.S. Postgrad. St. of the Department of Power Engineering, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: Tsyhan.P.S@nmu.one;

**Purpose.** To substantiate a technique of a choice of nominal power of power transformers for increase of their use efficiency in distributive electric networks of the cities

**Methods.** Analytical processing of statistical data.

**Findings.** The paper solves the problem of efficient use of the installed power of transformers, their rational choice in the design of urban electrical networks. It was found that the choice of transformers according to classical methods causes a significant error and an overestimation of the rated power at the design stage. The method of reducing this error was developed for selecting the power of transformers of urban electrical networks. This method takes into account the predicted indicators of the operating modes of the equipment, the type of consumers, the load capacity of the equipment, the parameters of the operating mode and the environment, constant heating time of existing types of transformers that can be accepted for installation, the appropriate level of reactive load compensation.

**Originality** The scientific novelty lies in the development of the method for selecting the rated power of power transformers 6 (20) /0.4 kV urban distribution networks by comprehensive consideration of the parameters of typical consumers and their actual structure, which will effectively use transformer equipment for load capacity during the regulated period of their operation.

**Practical value.** The obtained results show the increase in the efficiency of capital and operating costs by selecting a rational rated power of distribution transformers 6 (20) / 0.4 kV with ensuring the effective use of their load capacity in the conditions of electric grids of cities.

**Keywords:** reactive power compensation; electrical distribution grids; loading capacity of the transformers.

## REFERENCES

- [1] Lutsenko, I.M., Kalinnikov, V.B. (2011). Justification of the feasibility of transition to the system of servicing power transformers according to the current technical condition. Materials of the international conference "Forum of miners - 2011", 4, 75–79.
- [2] Zaika, V.T., Kotenko, S.S., Lutsenko, I.M. (2010). Load capacity of transformers of distribution networks of urban-type settlements. Scientific Bulletin of the National Mining University, 6, 86–91.
- [3] Fedorov, A.A. (1973). Reference book on power supply of industrial enterprises: in 2 Vol. Under the general editorship of, Moscow, Energoatomizdat, 24.
- [4] DSTU-N B V.2.5-80:2015. 2016-01-07, 79.
- [5] State building codes of Ukraine, Design of electrical equipment of civil objects. DBN V.2.5-23:2010 Kyiv, Ministry of Regional Development and Construction of Ukraine 2010, 102.
- [6] Lutsenko, I.M., Koshelenko, E.V., Tsygan, P.S. (2017). Improving the accuracy of choice and efficiency of the use of power transformers of distribution networks. KrNU Bulletin, Kremenchuk, Ex. 5/2017 (106).
- [7] DSTU 3463-96. Load guide for oil transformers. - Till. 1999-01-01, 101.
- [8] DSTU 2767-94. Manual on the load of power dry transformers. 1999-01-01, 75.
- [9] Papaika, Y.A., Pivnyak, G.G., Zhezhelenko, I.V. (2018). Energy efficiency of power supply systems, Dnipro, NTU "DP", 149.
- [10] Papaika, Yu.A., Lysenko, A.G. (2012). Methods of determining the nominal power of shop transformers in the presence of electrical receivers with nonlinear volt-ampere characteristic. Mining electromechanics and automatics, 88, 28-33.
- [11] Tonkal, V.E., Novoseltsev, A.V., Denisyuk, S.P. (1992). Balance of energies in power chains. Kyiv, Naukova Dumka, 312.
- [12] Uschapovsky, K.V. (2015). Forecasts of the development of electricity in Ukraine: reliability and reliability assessment. Energy Saving Energy, 7, 14-23.
- [13] Zhezhelenko, I.V., Trofimov, G.G., Vorotnitsky, V.E., Isaev, V.A. (2017). Integrated approach to the problem of increasing the energy efficiency of electrical networks. 2017, 2 (610), 14-16.
- [14] Papaika, Y.A., Zhezhelenko, I.V., Lysenko, O.G. (2018). Assessment of energy efficiency of power supply systems using reliability index. Mining electromechanics and automatics, 100, 25-30.
- [15] Kotsur, I., Gurazda, A., Dolya, B., Shestov, L., (2020). Energy-efficient electric drive of ventilation installations. Electrical engineering and electricity. 1, 18-25. <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2021-1-2>
- [16] Papaika, Y., Lysenko, O., Bublikov, A., & Olishevsky, I. (2021). Problems of electromagnetic compatibility of powerful energy associations with mass join-on of renewable energy sources. Electrical engineering and electrical energetics, (1), 34-45. <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2021-1->

УДК 621.316.13

## ПОЛІНОМІАЛЬНА АПРОКСИМАЦІЯ ДИНАМІЧНИХ СИГНАЛІВ ОДНОПЛАТФОРМЕННИХ ЖД ВАГ

КОЛИСНИЧЕНКО І.Ю. аспірант кафедри кіберфізичних та інформаційно-вимірювальних систем Дніпровської Політехніки, Дніпро, Україна, e-mail: Kolyasnychenkoilya847@gmail.com;

ТКАЧОВ В.В. д-р техн. наук, професор кафедри кіберфізичних та інформаційно-вимірювальних систем Дніпровської Політехніки, Дніпро, Україна, e-mail: tkachevv@ukr.net;

**Мета роботи.** Отримання апроксимуючої функції (або системи апроксимуючих рівнянь), яка з мінімальною похибкою зробить наближення до наявних даних по проїзду залізничних об'єктів через 1-ну платформні залізничні ваги.

**Методи дослідження.** Для розв'язання поставленої задачі використовуються числові методи, а саме апроксимація поліноміальними функціями  $n$ -го порядку. Експериментальні данні, на основі яких виконуються дослідження було отримано з системи зважування та ідентифікації вагонів у русі на одно платформних вагах. Автоматизація процесу апроксимації відбувається за допомогою програми, написаної на мові програмування Python в якій, для отримання коефіцієнтів многочлена, використано функції `polifit` та `polyid` бібліотеки `numpy`.

**Отримані результати.** Завдяки використанню поліноміальної апроксимації при обробці даних з тензометричних залізничних вагових систем вдалось отримати систему лінійних рівнянь, які з мінімальною похибкою відновили експериментальні дані, що були отримані з існуючої системи підприємства Північний ГЗК: Метінвест.

При нормалізації показань датчиків від умовних одиниць, отриманих з підсумкової коробки до діапазону значень  $[0 ; 1]$  з'явилась змога, у процентному співвідношенні, описати рухомий залізничний об'єкт. Це дає змогу уникнути залежності кінцевих результатів від швидкості проїзду вагона або локомотива, що призводить до підвищення точності ідентифікації вагонів у рухомому складі за рахунок використання процентного співвідношення перебування осей на ваговій платформі(наїзд/з'їзд). З'явилась можливість визначити тип вагона з однаковою кількістю осей, але різними характеристиками міжосьового простору та бази рухомого складу.

**Наукова новизна.** Новизна полягає в отриманні загального методу апроксимації експериментальних даних проїзду вагонів через одноплатформні ваги, який можна використовувати для навчання інтелектуальних систем та генерації, наближених до реальних даних проїзду вагона( за рахунок накладання шумів, тощо. ).

**Практична цінність.** Підвищення точності та швидкості ідентифікації вагона у цілому а також можливість ідентифікувати тип вагона з однаковою кількістю осей у залізничному складі, зменшує час простою підприємства, що сприяє збільшенню кількості зважених та ідентифікованих рухомих об'єктів. Методи, наведені у роботі, можуть бути використанні як для ідентифікації, так і для задач, кінцевим результатом яких є класифікація вхідних даних( нейронні сітки та т.п. ).

**Ключові слова:** ваги, вагова платформа, залізничний вагон, поліном, апроксимація, оцінка похибки, ідентифікація

### І. ВСТУП

Системи відносин між підприємствами спираються на взаємні розрахунки за відвантаженою продукцією, яку потрібно оцінити (зважити, виміряти і т.п.). Це займає чимало часу, а в разі збоїв – є критичним (не в останню чергу через присутність людського фактора). У зв'язку з цим, усе більша кількість підприємств потребують системи зважування вагонів у русі (динаміка), які витратять мінімальний час на обробку інформації, не знижуючи якості ідентифікації і точності. Також, для ряду підприємств, ключовим критерієм є можливість системи коректно ідентифікувати максимальну кількість типів рухомих об'єктів.

Системи зважування у русі [1], [4], [5], [8] мо-

жуть працювати лише з сигналами, які повністю описують проїзд вагона по ваговій платформі(у разі використання вагів для повагонного або повізкового зважування). При реалізації, для таких систем, алгоритму інтелектуальної обробки інформації необхідно мати велику вибірку експериментальних(або сгенерованих штучно, з максимальним наближенням до існуючих) даних, на основі яких можна виконати навчання системи(нейронна сітка). Для аналітичного описання проїзду вагона використовується апроксимація або інтерполяція, в залежності від очікуваного кінцевого результату(крива, відновлена за допомогою отриманої залежності, повинна проходити через усі точки, або наближатися до них з мінімальним відхиленням).

## II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

На даний момент існують декілька способів реалізації систем ідентифікації залізничних рухомих об'єктів, алгоритми яких лягли в більшість рішень, доступних на ринку та описаних у роботах [1], [4], [5], [8], а також алгоритми для роботи з автомобільною динамікою (ідеї яких можуть бути використані при проектуванні залізничної системи): [7], [9], [10].

Одним з основних алгоритмів, який широко використовується у вітчизняних системах, є робота Драчука Є.Ф. «Методи зважування залізничних об'єктів» [1], який запропонував (і запатентував) ряд методів, заснованих на складанні унікальних комбінацій наїздів/з'їздів колісних пар на вагову платформу, з подальшим зіставленням цих комбінацій з наперед заданими в системі шаблонами для кожного типу рухомого об'єкта, використовуваного на ваговому терміналі. Метод дозволяє працювати як на 1-но, так і на 2-во платформних вагах.

У методі можна виділити кілька ключових недоліків, які не дозволяють повсюди використовувати системи, побудовані на основі запропонованого алгоритму.

Основним обмеженням системи є необхідність мати заздалегідь задані комбінації наїздів/з'їздів для кожного типу рухомого об'єкта. При цьому на 2-х системах з різними розмірами вагової платформи комбінації можуть відрізнитися, що не дозволяє скласти один шаблон (використовуючи раніше отримані експериментальні дані) і застосовувати його при необхідності. Це накладає істотні обмеження, оскільки не всім підприємствам заздалегідь відомо, які саме типи вагонів будуть зважуватися на даній ділянці вагового комплексу. У разі потрапляння на платформу типу вагона, якого немає в шаблонах - система не зможе його розпізнати, що призведе до відбраковування поточного вагона і накопичення помилки ідентифікації вагонів для складу.

Більшість закордонних систем зважування вагонів у русі (WIM - weight in motion) крім зважування, включають у себе систему детекції дефектів колісних пар (до дефектів, які можуть бути виявлені такими системами відносяться: нерівномірний знос колеса, повзуну, вищербини, тощо) (рис.1) [17], шляхом встановлення тензOMETричних датчиків у залізничні рейки через невеликі проміжки (ці датчики також використовуються для зважування).

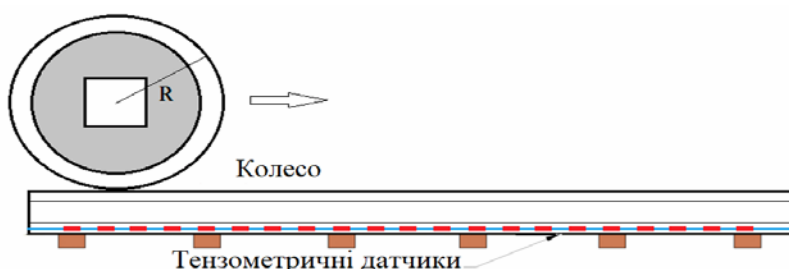


Рисунок 1. Приклад системи контролю дефектів колісних пар на базі тензOMETричних датчиків

Для ідентифікації і прив'язки ваги до вагона в таких системах додатково встановлюються дорожні датчики, які визначають початок і кінець заїзду вагона на вагову платформу. Оскільки в таких системах велика кількість датчиків, це зменшує відмовостійкість, а наявність окремих модулів ідентифікації та зважування не дозволяють як отримати інформацію про вагон (тип, вісність і т.п.), так і ідентифікувати проблемні вагони (що не були розпізнані на етапі ідентифікації).

Відома велика кількість методів апроксимації та інтерполяції даних (основні методи описані в підручнику «Порівняльний аналіз методів апроксимації» [13]). Для описання ступінчатого сигналу (який описує проїзд вагона) використовують апроксимацію сигмоїдою, поліномами  $n$ -го ступіню, ряди Фур'є та інші. В роботах [3], [6], [11], [12] наведені основні ідею та підходи до апроксимації з використанням рядів Фур'є та поліномів.

## III. МЕТА РОБОТИ

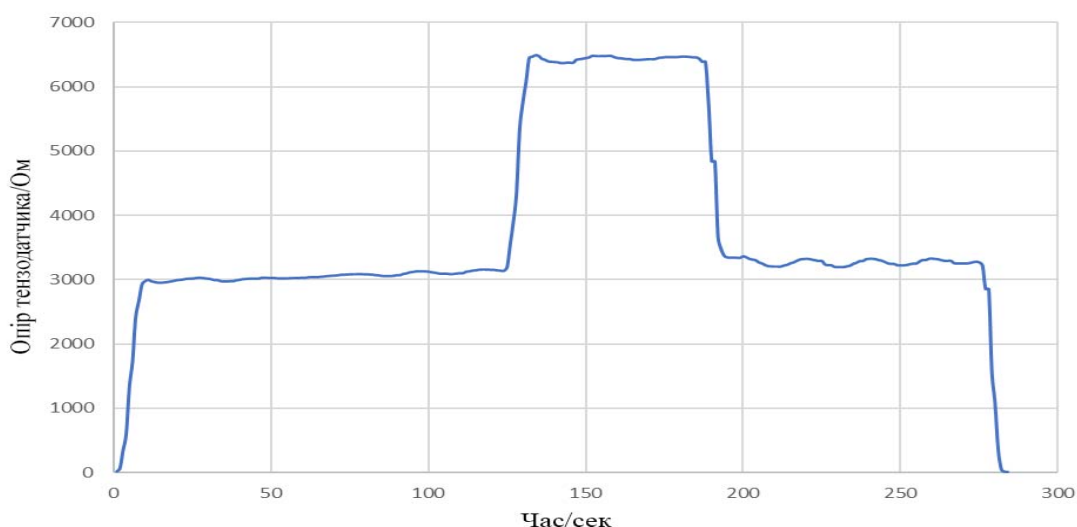
Неефективність існуючих систем ідентифікації

вагона в динаміці приводить нас до задачі розробки алгоритму, який дозволить, використовуючи інформацію, отриману від тензOMETричних датчиків (епюри), з мінімальною похибкою ідентифікувати всі вагони у складі, а ті, які не можуть бути ідентифіковані, - спробувати передбачити з максимальною точністю.

Маючи велику вибірку експериментальних даних (епюри) за всіма типами вагонів, які використовуються на території України, необхідно отримати апроксимуючу функцію (або систему апроксимуючих рівнянь), яка з мінімальною похибкою зробить наближення до наявних даних.

## IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Розглянемо графік проїзду 1-го візка 4-вісного локомотива через 1-но платформену вагову платформу, що стоїть на 4-х тензOMETричних датчиках, які підключені через підсумкову коробку (рис.2).



**Рисунок 2.** Проїзд 1-го візка 4-вісного локомотива через 1-но платформну вагову платформу

Апроксимацію будемо проводити поліномами  $n$ -го ступеню.

Оцінку помилки наближення функції розраховуватимемо за формулою середньоквадратичного відхилення:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{k=0}^n (y_k - f(x_k))^2}{n}} \quad (1)$$

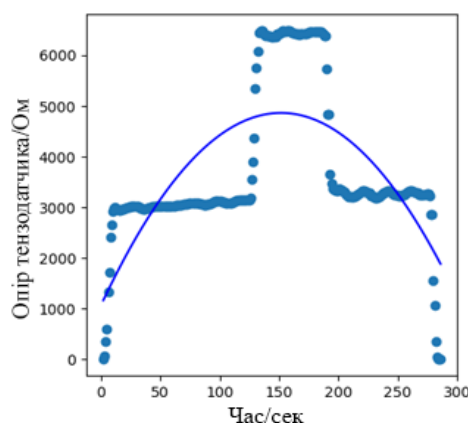
, де  $n$  – кількість точок апроксимації;  
 $y_k$  – експериментальне значення у точці  $k$ ;  
 $f(x_k)$  – значення апроксимації у точці  $k$ .

Написано на мові Python програму, яка, використовуючи бібліотеку NumPy [16], автоматизує процес апроксимації експериментальних даних, підготовлених у табличному форматі.

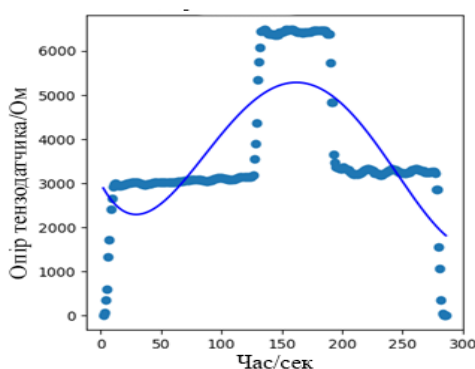
NumPy [16] – це бібліотека мови python, яка додає підтримку великих багатомірних масивів та матриць, разом з бібліотекою високомірних математичних функцій для операцій з цими масивами.

З цієї бібліотеки нас цікавлять 2-і функції, які дають змогу отримувати список коефіцієнтів многочлена - `polifit` та `polyid`.

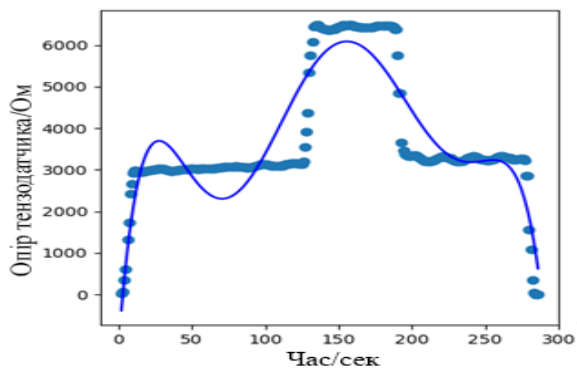
Використовуючи дану програму, оцінимо наближення всього графіка поліномами 2, 4, 6, 8 порядку (рис.3-6).



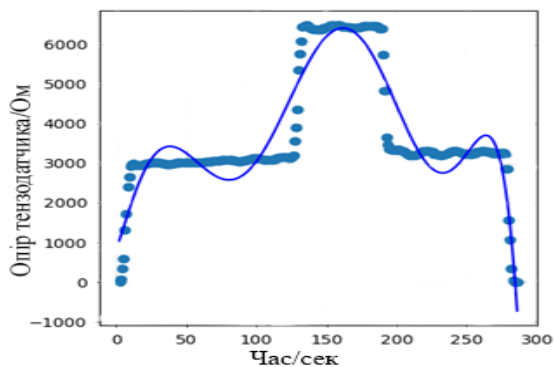
**Рисунок 3.** Апроксимація проїзду 4-вісного локомотива поліномом 2-го ступеню



**Рисунок 4.** Апроксимація проїзду 4-вісного локомотива поліномом 4-го ступеня



**Рисунок 5.** Апроксимація проїзду 4-вісного локомотива поліномом 6-го ступеня



**Рисунок 6.** Апроксимація проїзду 4-вісного локомотива поліномом 8-го ступеня

Використовуючи (1) розрахуємо середню похибку для поліномів 2, 4, 6, 8 порядку та запишемо їх до таблиці 1.

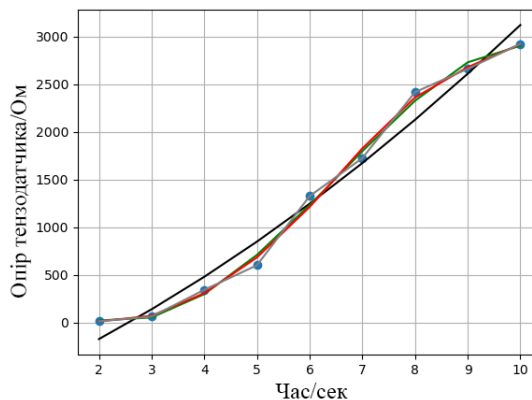
**Таблиця 1.** Середня похибка апроксимації експериментальних даних проїзду 4-вісного локомотива для поліномів 2, 4, 6, 8 порядку

	Поліном 2-го ступеня	Поліном 4-го ступеня	Поліном 6-го ступеня	Поліном 8-го ступеня
Похибка	17.14%	15.68%	10.66%	8.584%

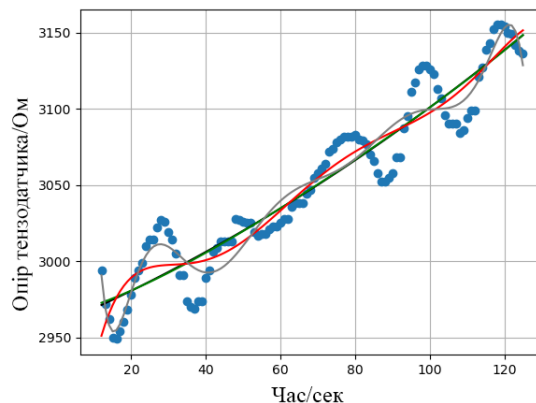
Аналіз результатів апроксимації( таб.1 ) показує, що при використанні полінома 8 ступеня середня похибка склала 8.58%. За нормами ДСТУ OIML R 106 [2], при класі точності ЖД ваг 1 (який найчастіше використовують при оцінюванні), допустимі межі похибки = 0.5%. Оскільки дана похибка належить до оцінки точності ваг, похибка для ідентифікації може бути вища, але мінімально можлива. Отримуємо, що похибка при апроксимації всього графіка дуже велика і не може бути використана для подальших обчислень.

Розіб'ємо графік на частини і проведемо наближення функції поліномами з порядками, які ми вико-

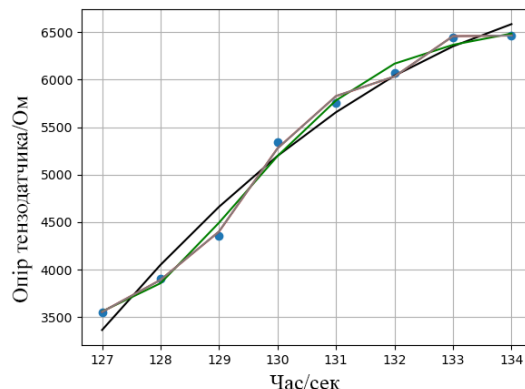
ристовували раніше(рис.7-13). У результаті отримаємо такі дані(таб.2) (на графіку чорним - поліном 2-го порядку, зеленим - поліном 4-го порядку, червоним - поліном 6-го порядку, сірим - поліном 8-го порядку):



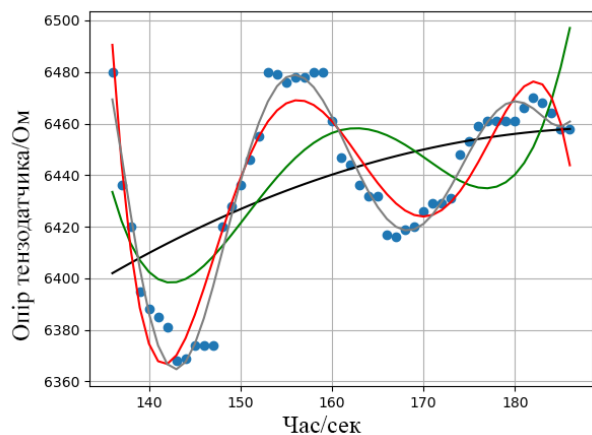
**Рисунок 7.** Процес заїзду 1-ї осі на вагову платформу



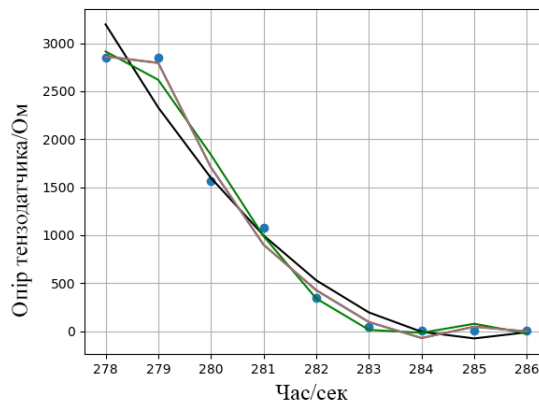
**Рисунок 8.** Процес проїзду 1-ї осі по ваговій платформі



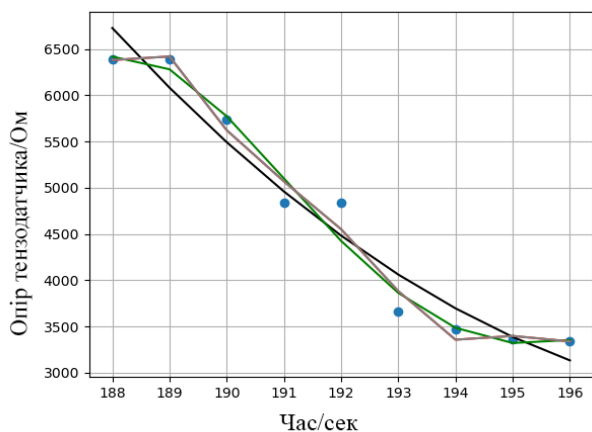
**Рисунок 9.** Процес заїзду 2-ї осі на вагову платформу



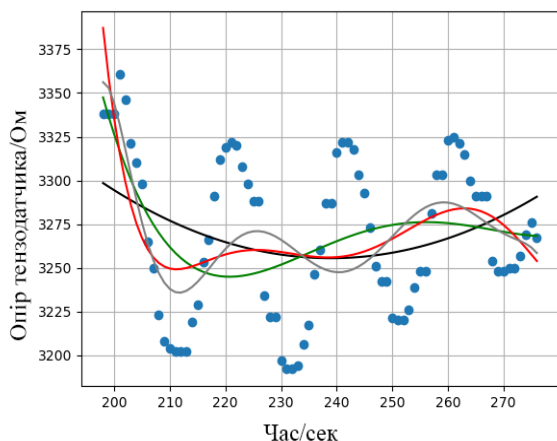
**Рисунок 10.** Процес проїзду 2-х осей по ваговій платформі



**Рисунок 13.** Процес заїзду 1-ї осі на вагову платформу



**Рисунок 11.** Процес з'їзду 1-ї осі



**Рисунок 12.** Процес проїзду 2-ї осі по ваговій платформі

**Таблиця 2.** Середня похибка апроксимації на кожній з ділянок

	Поліном 2-го ступеня	Поліном 4-го ступеня	Поліном 6-го ступеня	Поліном 8-го ступеня
Процес заїзду 1-ї осі	6.5%	1.04%	0.96%	0%
Процес проїзду 1-ї осі	0.27%	0.27%	0.259%	0.25%
Процес заїзду 2-ї осі	2.45%	1.32%	0.62%	0.63%
Процес проїзду 2-х осей	0.44%	0.38%	0.16%	0.10%
Процес з'їзду 1-ї осі	4.2%	2.79%	2.36%	2.37%
Процес проїзду 2-ї осі	0.65%	0.6%	0.59%	0.57%
Процес з'їзду 2-ї осі	3.48%	1.97%	1.36%	1.37%

У процесі ідентифікації нас цікавить факт різкого зростання або спаду значень (процес наїзду або з'їзду) і наближення проїзду осі по вагону в рамках допустимої похибки.

Виходячи з цього, отримуємо систему рівнянь для розглянутого прикладу (проїзд 2-вісного візку через 1-но платформні ваги):



$$f(x) = \begin{cases} 0.18x^6 - 6.1x^5 + 79.57x^4 - 524.5x^3 + 1924x^2 - 3604x + 2629, & 0 < x \leq 10 \\ (3.4 \cdot 10^{-7})x^4 - (1.03 \cdot 10^{-4})x^3 + 0.014x^2 + 0.621x + 2963, & 11 \leq x \leq 125 \\ 3.993x^4 - 2099x^3 + (4.1 \cdot 10^5)x^2 - (3.6 \cdot 10^7)x + (1.9 \cdot 10^9), & 126 \leq x \leq 134 \\ (4.5 \cdot 10^{-4})x^4 - 0.29x^3 + 69x^2 - 7332x + (2.97 \cdot 10^5), & 135 \leq x \leq 186 \\ -1.161x^6 + 1338x^5 - (6.4 \cdot 10^5)x^4 + (1.6 \cdot 10^8)x^3 - (2.37 \cdot 10^{10})x^2 + \\ (1.82 \cdot 10^{12})x - 5.82 \cdot 10^{13} & 187 \leq x \leq 196 \\ 0.026x^2 - 12.25x + 4720, & 197 \leq x \leq 276 \\ 0.0025x^6 - 2.8x^5 + 1007x^4 - 633.2x^3 - (8.03 \cdot 10^7)x^2 + (1.82 \cdot 10^{10})x - \\ (1.28 \cdot 10^{12}), & 277 \leq x \leq 286 \end{cases} \quad (2)$$

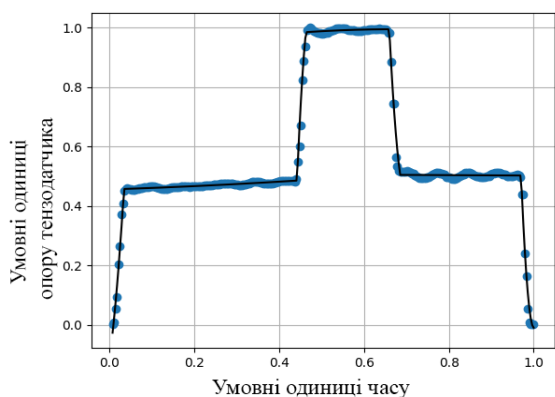
Оскільки різні об'єкти можуть мати одну вісь, але при цьому різну базу, співвідношення наїздів/проїздів/з'їздів у часі буде різним. Так ми можемо ідентифікувати рухомі об'єкти, що мають однакову осність.

Щоб уникнути величезних коефіцієнтів, виконаємо нормалізацію експериментальних значень в діапазоні від 0 до 1, підберемо ступінь полінома, виходячи з похибок, отриманих раніше у таблиці 1, і повторимо апроксимацію.

Отримаємо остаточну систему рівнянь:

$$f(x) = \begin{cases} 178.9x^2 + 10.63x + 0.1098, & 0 < x < 0.035 \\ 0.04764x^2 + 0.0462x + 0.4558, & 0.035 \leq x < 0.444 \\ -475.6x^2 + 454.3x - 107.4, & 0.444 \leq x < 0.465 \\ -0.2295x^2 + 0.3077x + 0.892, & 0.465 \leq x < 0.661 \\ 352.6x^2 - 483.2x + 172.9, & 0.661 \leq x < 0.685 \\ -0.0072x + 0.5097, & 0.685 \leq x < 0.972 \\ 556.79x^2 - 1114.3x - 557.5, & 0.972 \leq x \leq 1 \end{cases}$$

, де  $x$  – номер експериментального виміру



**Рисунок 14.** Графік, відновлений отриманою системою рівнянь (3). Синім - вхідні дані, чорним - відновлений графік.

Розглянувши графік (рис.14), який було отрима-

но з використанням функції (3) бачимо, що апроксимуюча система рівнянь з допустимою похибкою (1.3%), не залежно від швидкості руху залізничного рухомого об'єкту (завдяки нормалізації значень до діапазону від 0 до 1) відновлює дані, отримані експериментально.

## V. ВИСНОВКИ

У результаті, була отримана система рівнянь, що описує проїзд 1-го візка 4-хвісного локомотива через 1-ну платформну вагову платформу. Відновлена апроксимуюча система рівнянь, що описує частини графіка окремо, показала наближення до початкових даних з похибкою 1.3%, що дозволить у подальшому використовувати її для ідентифікації заданого типу рухомого складу. Швидкість обробки даних, використовуючи запропонований метод, не поступається існуючим.

Таким чином, запропонований метод наближення дозволяє, маючи ряд експериментальних даних,

аналітично описати кожен тип рухомого об'єкту, висловивши переходи наїздів/проїздів/з'їздів, а також їх процентне співвідношення, що дозволить, при однаковій вісності, але відмінних інших характеристиках (база, довжина вагона і т.п.) відрізнити один тип рухомого об'єкта від іншого.

Цей метод використано у інтелектуальній системі розпізнавання типів вагону у русі, тестування якої показують збільшення кількості розпізнаних вагонів у рухомому складі.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Способ взвешивания железнодорожных объектов : пат. RU2390735C1 Россия : G01G19/04. Заявл. 20.10.2008 ; опубл. 27.05.2010, Бюл. № 15.
- [2] ДСТУ OIML R106-1 Ваги залізничні платформні автоматичні: ДП «УкрНДНЦ», 2019. – 11 с.
- [3] Liu K., Guo X. Fuzzy Least Squares Approximation Using Fuzzy Polynomial. *Mathematical Problems in Engineering*. 2021. Vol. 2021. P. 1–8. URL: <https://doi.org/10.1155/2021/9979544> (date of access: 06.10.2021).
- [4] Test of WIM sensors and systems on an urban road / M. Caprez et al. *International Journal of Heavy Vehicle Systems*. 2000. Vol. 7, no. 2/3. P. 169. URL: <https://doi.org/10.1504/ijhvs.2000.005003> (date of access: 06.10.2021).
- [5] Evaluation of an in-motion vehicle weighing method via Grey estimation model / S. Fujimoto et al. *SICE 2002. of the 41st SICE Annual Conference, Osaka, Japan*. URL: <https://doi.org/10.1109/sice.2002.1195311> (date of access: 06.10.2021).
- [6] M. A. Fariborzi Araghi, A. Fallahzadeh Inherited fuzzy interpolation based on the inherited lower-upper factorization. *Fuzzy Information and Engineering*. 2014. Vol. 6, no. 4. P. 427–434.
- [7] Bernard Jacob, Véronique Feypell-de La Beaumelleb. Improving truck safety: Potential of weigh-in-motion technology. *IATSS Research*. 2010. Vol. 34, no. 1. P. 9–15.
- [8] Research and Design of vehicle Dynamic Weighing System Based on Piezoelectric Quartz Sensor / Jun Wei, Mengjun Zhang, Ligeng Qin, Tiejun Zhang, Wenzheng Jiang, Chi Zhang School of Mechanical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004. 2015. P. 1229–1232.
- [9] Kirushanth S., Kabaso B. Design and Development of Weigh-In-Motion Using Vehicular Telematics. *Journal of Sensors*. 2020. Vol. 2020. P. 1–22. URL: <https://doi.org/10.1155/2020/7871215> (date of access: 06.10.2021).
- [10] Dong M., Zhu F., Yu W. Research on a Dynamic Truck Scale Weighing System for Container. *First International Conference on Information Sciences, Machinery, Materials and Energy, Chongqing, China, 11–13 April 2015. Paris, France, 2015*. URL: <https://doi.org/10.2991/icismme-15.2015.21> (date of access: 06.10.2021).
- [11] Kidron I. Polynomial Approximation of Functions: Historical Perspective and New Tools. *International Journal of Computers for Mathematical Learning*. 2003. Vol. 8, no. 3. P. 299–331. URL: <https://doi.org/10.1023/b:ijco.0000021793.71677.cd> (date of access: 06.10.2021).
- [12] Susant K. J., Balasubramanian G., Pradhan N. Fourier Approach to Function Approximation. 2011.
- [13] Порівняльний аналіз методів апроксимації / Н. Грищенко Н., Семеріков С., Хараджян О., Чернов Є. *Кривий Піг: КДПІ*, 1998. 25 с.
- [14] Рено Н. Н. Численные методы. Москва : Университет Книжный дом, 2007. 98 с.
- [15] Лапчик М. П., Рагулина М. И., Хеннер Е. К. Численные методы / ред. М. П. Лапчика. Москва : Издательс. центр "Академия", 2004. 384 с.
- [16] Вандер Плас Дж. Python для сложных задач. Наука о данных и машинное обучение. O'Reilly, 2018. 58 – 128 с.
- [17] Liu X.-Z., Xu C., Ni Y.-Q. Wayside Detection of Wheel Minor Defects in High-Speed Trains by a Bayesian Blind Source Separation Method. *Sensors*. 2019. Vol. 19, no. 18. P. 3981. URL: <https://doi.org/10.3390/s19183981> (date of access: 07.10.2021).

Стаття надійшла до редакції 20.04.2021

## ПОЛИНОМИАЛЬНАЯ АППРОКСИМАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ОДНОПЛАТФОРМЕННЫХ ЖД ВЕСОВ

КОЛИСНИЧЕНКО І.Ю. аспірант кафедри кіберфізичних і інформаційно-вимірних систем Дніпровської Політехніки, Дніпр, Україна, e-mail: Kolysnychenkoillya847@gmail.com;

ТКАЧЕВ В.В. д-р техн. наук, професор кафедри кіберфізических і інформаційно-вимірних систем Дніпровської Політехніки, Дніпр, Україна, e-mail: tkachevv@ukr.net

**Цель работы.** Получение аппроксимирующей функции (или системы аппроксимирующих уравнений), которая с минимальной погрешностью сделает приближения к имеющимся данным по поезду железнодорожных

объектов через 1-но платформенные весы.

**Методы исследования.** Для решения поставленной задачи используются численные методы, а именно аппроксимация полиномиальными функциями  $n$ -го порядка. Экспериментальные данные, на основе которых выполняются опыты были получены из системы взвешивания и идентификации вагонов в движении на одно платформенных весах. Автоматизация процесса аппроксимации происходит с помощью программы, написанной на языке программирования Python в которой, для получения коэффициентов многочлена, использовано функции `polyfit` и `polyid` библиотеки `numpy`.

**Полученные результаты.** Благодаря использованию полиномиальной аппроксимации при обработке данных с тензометрических железнодорожных весовых систем удалось получить систему линейных уравнений, которые с минимальной ошибкой восстановили экспериментальные данные, которые были получены с существующей системы предприятия Северный ГОК: Метинвест.

При нормализации показаний датчиков от условных единиц, полученный из суммирующей коробки к диапазону значений  $[0; 1]$  появилась возможность, в процентном соотношении, описать подвижной железнодорожный объект. Это дает возможность избежать зависимость конечных результатов от скорости проезда вагона или локомотива, что приводит к повышению точности идентификации вагонов в подвижном составе за счет использования процентного соотношения перебивания осей на весовой платформе (наезд/съезд). Появилась возможность определить тип вагона с одинаковым количеством осей, но разными характеристиками межосевого пространства и базы подвижного состава.

**Научная новизна.** Новизна заключается в полученные общего метода аппроксимации экспериментальных данных проезда вагонов через одноплатформенные весы, который можно использовать для обучения интеллектуальных систем и генерации приближенных к реальным данным проезда вагона (за счет наложения шумов, пр.).

**Практическая ценность.** Повышение точности и скорости идентификации вагона в целом, что уменьшает время простоя предприятия, способствует увеличению количества взвешенных и идентифицированных движущихся объектов, а так же возможность идентификации типа вагона с одинаковым количеством осей в железнодорожном составе. Методы, приведенные в работе, могут быть использованы как для идентификации, так и для задач, конечным результатом которых является классификация входных данных (нейронные сети и т.п.).

**Ключевые слова:** весы, весовая платформа, железнодорожный вагон, полином, аппроксимация, оценка погрешности, идентификация.

## POLYNOMIAL APPROXIMATION OF DYNAMIC SIGNALS OF SINGLE PLATFORM RAILWAY SCALES

KOLYSNYCHENKO I.Y. Postgraduate student of the department of cyber-physical and information-measuring systems of Dnipro Polytechnic, Dnipro, Ukraine, e-mail: Kolysnychenkoilya847@gmail.com;

V. V. TKACHOV Sci.D, Professor of the Department of Cyberphysical and Information-measuring Systems, Dnipro University of technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: tkachevv@ukr.net

**Purpose.** Obtaining an approximating function (or a system of approximating equations), which, with a minimum error, will make approximations to the available data on a train of railway objects through 1 platform scales.

**Methodology.** To solve this problem, numerical methods are used, namely, the approximation by polynomial functions of the  $n$ th order. The experimental data on the basis of which the experiments were carried out were obtained from the weighing and identification system of wagon in motion on a single platform scale. The approximation process is automated using a program written in the Python programming language in which the `polyFit` and `polyid` functions of the `numpy` library are used to obtain the polynomial coefficients.

**Findings.** Due to the use of polynomial approximation in data processing from tensometric railroad weighing systems, it was possible to obtain a system of linear equations that, with minimal error, restored the experimental data that were obtained from the existing system of the Severny GOK: Metinvest enterprise.

When normalizing the readings of the sensors from conventional units, obtained from the summing box to the range of values  $[0; 1]$  it became possible, in percentage terms, to describe a railway object. This makes it possible to avoid the dependence of the final results on the travel speed of the carriage or locomotive, which leads to an increase in the accuracy of the identification of cars in the rolling stock due to the use of the percentage of the axles staying on the weighing platform (approach / exit). It became possible to determine the type of carriage with the same number of axles, but different characteristics of the center space and the base of the rolling stock.

**Originality.** The novelty is to obtain a general method of approximation of experimental data of the passage of wagons through a single-platform scales, which can be used to train intelligent systems and generate close to real data

of the passage of a car (due to the imposition of noise, etc.).

**Practical value.** Improving the accuracy and speed of the carriage identification as a whole, which reduces the plant downtime, contributes to an increase in the number of weighed and identified moving objects, as well as the ability to identify the type of carriage with the same number of axles in the train. The methods presented in the work can be used both for identification and for tasks, the end result of which is the classification of input data (neural networks, etc.).

**Keywords:** scales, weighing platform, railway car, polynomial, approximation, error estimation, identification.

#### REFERENCES

- [1] Sposob vzveshivaniya zheleznodorozhnykh ob"ektov : pat. RU2390735C1 Rossiya : G01G19/04. Zayavl. 20.10.2008 ; opubl. 27.05.2010, Bjul. № 15.
- [2] DSTU OIML R106-1 Vagi zaliznichni platformni avtomatichni: DP «UkrNDNC», 2019. – 11 c.
- [3] Liu K., Guo X. Fuzzy Least Squares Approximation Using Fuzzy Polynomial. *Mathematical Problems in Engineering*. 2021. Vol. 2021. P. 1–8. URL: <https://doi.org/10.1155/2021/9979544> (date of access: 06.10.2021).
- [4] Test of WIM sensors and systems on an urban road / M. Caprez et al. *International Journal of Heavy Vehicle Systems*. 2000. Vol. 7, no. 2/3. P. 169. URL: <https://doi.org/10.1504/ijhvs.2000.005003> (date of access: 06.10.2021).
- [5] Evaluation of an in-motion vehicle weighing method via Grey estimation model / S. Fujimoto et al. *SICE 2002. of the 41st SICE Annual Conference, Osaka, Japan*. URL: <https://doi.org/10.1109/sice.2002.1195311> (date of access: 06.10.2021).
- [6] M. A. Fariborzi Araghi, A. Fallahzadeh Inherited fuzzy interpolation based on the inherited lower-upper factorization. *Fuzzy Information and Engineering*. 2014. Vol. 6, no. 4. P. 427–434.
- [7] Bernard Jacob, Véronique Feypell-de La Beaumelleb. Improving truck safety: Potential of weigh-in-motion technology. *IATSS Research*. 2010. Vol. 34, no. 1. P. 9–15.
- [8] Research and Design of vehicle Dynamic Weighing System Based on Piezoelectric Quartz Sensor / Jun Wei, Mengjun Zhang, Ligeng Qin, Tieyi Zhang, Wenzheng Jiang, Chi Zhang School of Mechanical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004. 2015. P. 1229–1232.
- [9] Kirushanth S., Kabaso B. Design and Development of Weigh-In-Motion Using Vehicular Telematics. *Journal of Sensors*. 2020. Vol. 2020. P. 1–22. URL: <https://doi.org/10.1155/2020/7871215> (date of access: 06.10.2021).
- [10] Dong M., Zhu F., Yu W. Research on a Dynamic Truck Scale Weighing System for Container. *First International Conference on Information Sciences, Machinery, Materials and Energy, Chongqing, China, 11–13 April 2015. Paris, France, 2015*. URL: <https://doi.org/10.2991/icismme-15.2015.21> (date of access: 06.10.2021).
- [11] Kidron I. Polynomial Approximation of Functions: Historical Perspective and New Tools. *International Journal of Computers for Mathematical Learning*. 2003. Vol. 8, no. 3. P. 299–331. URL: <https://doi.org/10.1023/b:ijco.0000021793.71677.cd> (date of access: 06.10.2021).
- [12] Susant K. J., Balasubramanian G., Pradhan N. *Fourier Approach to Function Approximation*. 2011.
- [13] Porivnjal'nijj analiz metodiv aproksimacii / N. Grishhenko N., Semerikov S., Kharadzhan O., Chernov C. *Krivijj Rig: KDPI*, 1998. 25 s.
- [14] Reno N. N. *Chislennye metody*. Moskva : Universitet Knizhnyj dom, 2007. 98 s.
- [15] Lapchik M. P., Ragulina M. I., Khenner E. K. *Chislennye metody / red. M. P. Lapchika*. Moskva : Izdatel's. centr "Akademija", 2004. 384 s.
- [16] Vander Plas Dzh. *Python dlja slozhnykh zadach. Nauka o dannykh i mashinnoe obuchenie*. O'Relly, 2018. 58 – 128 c.
- [17] Liu X.-Z., Xu C., Ni Y.-Q. Wayside Detection of Wheel Minor Defects in High-Speed Trains by a Bayesian Blind Source Separation Method. *Sensors*. 2019. Vol. 19, no. 18. P. 3981. URL: <https://doi.org/10.3390/s19183981> (date of access: 07.10.2021).