

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Одеська політехніка»

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ ТА КОМП'ЮТЕРНІ СИСТЕМИ

- Автоматизовані електромеханічні системи
- Системи виробництва, передачі та розподілу електроенергії
- Енергозберігаючі технології в електроенергетиці
- Комп'ютерні системи, мережі та їх компоненти
- Системи штучного інтелекту
- Наука про дані та великі дані
- Енергозбереження засобами сучасної електротехніки

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЖУРНАЛ
ЗАСНОВАНО В 1965 РОЦІ

№ 43 (119)

Одеса
2025

Видавець – Національний університет «Одеська політехніка»

У журналі друкуються результати наукових досліджень, які стосуються розробки сучасних автоматизованих електромеханічних систем, проектування електромеханічних перетворювачів та електричних апаратів, мехатроніки, комп'ютерних систем та їх компонентів, інформаційних інтелектуальних систем, комп'ютерних мереж, моделювання динамічних систем, а також захисту інформації в комп'ютерних системах.

Журнал розраховано на інженерів та наукових працівників, які займаються дослідженням, проектуванням та експлуатацією електротехнічних та комп'ютерних систем та їх компонентів, а також на викладачів і студентів вищих та середніх навчальних закладів відповідних спеціальностей.

Друкується за рішенням Вченої ради Національного університету «Одеська політехніка» від 30.09.2025, протокол № 3

Головний редактор

Водічев В. А. (Нац. ун-т «Одеська політехніка»)

Заступники головного редактора:

Шапорин Р. О., Войтенко В. А. (Нац. ун-т «Одеська політехніка»)

Редакційна колегія

Проф., д.т.н. **Атаманюк Ігор**, Миколаївський національний аграрний університет, Україна

Проф., к.т.н. **Бардіс Ніколаос**, Грецька військова академія, Афіни, Греція

Проф., д.т.н. **Масвський Дмитро**, Національний університет «Одеська політехніка», Україна

Проф., д.т.н. **Востров Георгій**, Національний університет «Одеська політехніка», Україна

Проф., д.т.н. **Ву Вай Лок**, Нортумбрийський університет, Велика Британія

Проф., к.т.н. **Зайцева Олена**, Університет Жиліна, Словаччина

Доц., к.т.н. **Кисилевська Альона**, Національний університет «Одеська політехніка», Україна

Проф., д.т.н. **Маляр Василь**, Львівський політехнічний національний університет, Україна

Проф., д.т.н. **Оборський Геннадій**, Національний університет «Одеська політехніка», Україна

Проф., д.т.н. **Орловський Аркадіус**, Варшавський університет природничих наук, Польща

Проф., к.т.н. **Пересада Сергій**, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», Україна

Проф., д.т.н. **Петрушин Віктор**, Національний університет «Одеська політехніка», Україна

Проф., д.т.н. **Прокопович Ігор**, Національний університет «Одеська політехніка», Україна

Проф., к.т.н. **Рафайловський Горан**, Університет прикладних наук Берліну, Німеччина

Проф., д.т.н. **Романський Раді**, Технічний Університет Софії, Болгарія

Проф., д.т.н. **Саченко Анатолій**, Тернопільський національний економічний університет

Проф., д.т.н. **Ситніков Валерій**, Національний університет «Одеська політехніка», Україна

Проф., к.т.н. **Філіпс Кріс**, Університет Ньюкасла, Великобританія

Проф., д.т.н. **Харченко В'ячеслав**, Національний аерокосмічний університет імені Н.С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Україна

Виконавчий редактор Калінін О. Г. (Нац. ун-т «Одеська політехніка»)

Журнал включено до Переліку наукових фахових видань України (Категорія "Б"), в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора наук та доктора філософії (Наказ МОН України від 26.11.2020, № 1471) за спеціальностями: F1 - Прикладна математика, F3 - Комп'ютерні науки, F4 - Системний аналіз та наука про дані, F5 - Кібербезпека та захист інформації, F6 - Інформаційні системи і технології, F7 - Комп'ютерна інженерія, G3 - Електрична інженерія, G4 - Енерговиробництво (за спеціалізацією), G7 - Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка, G11 - Машнобудування (за спеціалізаціями).

Статті журналу індексуються в міжнародних базах даних: Index Copernicus International, Ulrich's Periodicals Directory, Electronic Journals Library, Google Scholar, Research Bib, а також в Національній бібліотеці України імені В. І. Вернадського.

Приймаються рукописи, підготовлені українською або англійською мовою. Рукописи статей проходять подвійне сліпе рецензування. Періодичність виходу журналу – три рази на рік.

Адреса редакційної колегії: Україна, 65044, м. Одеса, пр. Шевченка, 1, Національний університет «Одеська політехніка».

Тел.: +38(048) 703-84-54, +38(050) 234-77-22

E-mail: eltecs@op.edu.ua

Сайт <https://eltecs.op.edu.ua/index.php/journal>

ISSN 2221-3937 (Print)

ISSN 2221-3805 (on Line)

Ministry of Education and Science of Ukraine
Odesa Polytechnic National University

ELECTRICAL AND COMPUTER SYSTEMS

- **Automated Electromechanical Systems**
- **Electric Power Generation, Transmission and Distribution Systems**
- **Energy-Saving Technologies in the Electric Power Industry**
- **Computer Systems, Networks and Their Components**
- **Artificial Intelligence Systems**
- **Data Science and Big Data**
- **Energy Saving by Means of Modern Electrical Engineering**

SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

FOUNDED IN 1965

No. 43 (119)

Odesa
2025

DOI: <https://doi.org/10.15276/eltecs.43.119.2025>

UDC 004+62-5+621.3

Publisher – Odesa Polytechnic National University

The journal publishes the results of scientific research concerning the development of modern automated electro-mechanical systems, the design of electromechanical converters and electrical apparatus, mechatronics, computer systems and their components, information intelligence systems, computer networks, modeling of dynamic systems, as well as information security in computer systems. The journal reflects mathematic modeling and optimization of electrotechnical and electromechanics systems, ways of electric drives control allowing to saving energy, modern systems of power supply. Besides that, the materials about automatic control systems and systems of artificial intelligence are published in the journal.

The journal is designed for engineers and scientists that take part in researches, designing and exploitation of electrotechnical and computer systems and their components, and also for corresponding specialty teachers and students of high school.

The journal is printed according to the decision of the scientific council of Odesa Polytechnic National University from 30.09.2025, No. 3

Editor-in-chief

Vodichev V. A. (Odesa Polytechnic National University)

Deputy Editor-in-chief

Voytenko V. A., Shaporin R. O. (Odesa Polytechnic National University)

Editorial Board

Prof., DrS **Atamanyuk Igor**, Mykolayiv National Agrarian University, Ukraine

Prof., Dr **Bardis Nikolaos**, Hellenic Military Academy, Athens, Greece

Prof., DrS **Kharchenko Vyacheslav**, National Aerospace University named after N.E. Zhukovsky “Kharkiv Aviation Institute”, Ukraine

PhD **Kysylevska Alona**, Odesa Polytechnic National University, Ukraine

Prof., DrS **Malyar Vasyl**, Lviv Polytechnic National University, Ukraine

Prof., DrS **Oborskyi Hennadii**, Odesa Polytechnic National University, Ukraine

Prof., DrS **Orlowski Arkadiusz**, Warsaw University of Life Sciences, Poland

Prof., DrS **Peresada Sergei**, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Ukraine

Prof., DrS **Petrushyn Viktor**, Odesa Polytechnic National University, Ukraine

Prof., Dr **Phillips Chris**, Newcastle University, United Kingdom

Prof., DrS **Prokopovych Ihor**, Odesa Polytechnic National University, Ukraine

Prof., PhD **Rafajlovski Goran**, University of applied science Berlin, Germany

Prof., DrS **Romansky Radi**, Technical University of Sofia, Bulgaria

Prof., DrS **Sachenko Anatoly**, Ternopil National Economic University

Prof., DrS **Sytnikov Valeriy**, Odesa Polytechnic National University, Ukraine

Prof., DrS **Maevsky Ddmitro**, Odesa Polytechnic National University, Ukraine

Prof., DrS **Vostrov Georgy**, Odesa Polytechnic National University, Ukraine

Prof., DrS **Woo Wai Lok**, Northumbria University, United Kingdom

Prof., Dr **Zaitseva Elena**, Zilina University, Slovakia

Executive editor Kalinin O. G. (Odesa Polytechnic National University)

The Journal is included in the list of specialized scientific publications, which can be published results of theses for the degree of doctor and candidate of technical sciences (Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine dated November 26, 2020, No. 1471).

Journal articles are indexed in international databases: Index Copernicus International, Ulrich's Periodicals Directory, Electronic Journals Library, Google Scholar, Research Bib, and in National Library of Ukraine named after Vernadsky.

Manuscripts can be prepared in Ukrainian or English. Manuscripts are double-blind reviewing. Frequency of the magazine issue is three times a year.

Editorial board address: Odesa Polytechnic National University 1, Shevchenko Avenue, Odessa, 65044, Ukraine

Phone: +38(048) 703-84-54, +38(050) 234-77-22

E-mail: eltecs@op.edu.ua

Web-site: <http://eltecs.op.edu.ua/index.php/journal>

ISSN 2221-3937 (Print)

ISSN 2221-3805 (on Line)

ЗМІСТ

CONTENTS

	Стор.		Page
А. О. Бойко, О. В. Найдено, А. А. Савельєв, С. М. Забродський Особливості формування динамічних режимів асинхронних двигунів при пуску від одного пристрою	6	A. O. Boyko, O. V. Naidenko, A. A. Saveliev, S. M. Zabrodsky Features of Formation of Dynamic Modes of Asynchronous Motors when Started from One Device	6
Я. О. Соколов, В. О. Суворов Дослідження економічної ефективності використання трансформаторів з еко-дизайном в електричних мережах об'єднаної енергетичної системи України.....	16	Ya. O. Sokolov, V. O. Suvorov Research on the Economic Efficiency of using Eco-Designed Transformers in the Electric Grids of the Unified Energy System of Ukraine.....	16
В. О. Разінков Аналіз проблем функціонування системи енергомоніторингу комунального сектору	28	V. Razinkov Analysis of Problems in the Operation of the Energy Monitoring System in the Municipal Sector	28
Т. В. Ситніков, В. С. Ситніков Побудова вузла корекції фази для кібер-фізичних системна основі всепропускних фільтрів.....	34	T. Sytnikov V. Sytnikov A Phase Correction Node Construction for Cyber-Physical Systems Based on All-pass Filters	34
А. С. Колпиков, Е. М. Забарна, М. В. Лобачев Стан та розвиток технологій повторної ідентифікації людини в інтелектуальних відеосистемах	41	A. Kolpikov, E. Zabarna, M. Lobachev State and Development of Human Re-Identification Technologies in Intelligent Video Systems	41
І. С. Узун Метод побудови актив-зумовленого індексу напрямку новинного впливу для криптоактивів на основі zero-shot NLI та GDELT.....	51	I. S. Uzun Method for Constructing an Asset-Conditioned Index of News Direction of Impact for Crypto Assets using Zero-Shot NLI and GDELT.....	51
А. К. Топор, М. Ю. Шабовта Аналіз особливостей виконання диференційних захистів ліній електро-передач надвисокої напруги.....	61	Andrii Topor, Mykhailo Shabovta Analysis of the Features of Implementing Differential Protections of Extra High Voltage Power Transmission Lines	61
В. А. Войтенко, В. А. Водічев, О. Г. Калінін, В. О. Гладченко Однозонний тяговий електропривод міського легкового транспортного засобу	70	V. Voitenko, V. Vodichev, O. Kalinin, V. Gladchenko Single-Band Traction Electric Drive of a City Light Vehicle	70

Особливості формування динамічних режимів асинхронних двигунів при пуску від одного пристрою

А. О. Бойко, О. В. Найдено, А. А. Савельєв, С. М. Забродський
Національний університет «Одеська політехніка»

Анотація. У статті вирішується проблема формування динамічних режимів асинхронних двигунів під час пуску від одного пускового пристрою. Виконано математичний опис процесів відключення від мережі живлення та вибігання асинхронних двигунів. Проведено аналіз форми та величини напруги на комутуючих елементах під час вибігу. Дана оцінка впливу потужності двигунів на перехідні процеси підключення до мережі живлення. Дані рекомендації щодо забезпечення сприятливих умов підключення асинхронних двигунів до мережі живлення з урахуванням можливостей напівпровідникових пускових пристроїв та використання контактної апаратури.

Ключові слова: динамічні режими, асинхронний двигун, підключення до мережі, умови пуску, вибігання двигуна, перехідні процеси, початкові електромагнітні умови.

Вступ

В даний час як пускові пристрої для асинхронних двигунів (АД) використовуються пристрої плавного пуску Soft starter (Тиристорні перетворювачі напруги - ТПН) або перетворювачі частоти (ПЧ). Головними цілями керованого пуску є обмеження пускового струму АД з метою зменшення ударних навантажень у мережах та зменшення динамічних навантажень у механізмах [1]. Вартість пускових пристроїв порівняно висока і тому при нечастих пусках зменшення капітальних витрат застосовують один пусковий пристрій для послідовного пуску декількох приводних асинхронних двигунів. Сучасні програмовані пристрої плавного пуску надають користувачам безліч варіантів пуску для вибору оптимального за заданими технічними умовами. У той же час процес перемикання АД від пускового пристрою на мережу живлення залишається неврахованим і некерованим. При несприятливих поєднаннях початкових електромагнітних умов (ПЕМУ) підключення АД до мережі задані умови процесу пуску можуть бути значною мірою спотворені, хоча візуально процес перемикання може оцінюватися позитивно [2].

1. Аналіз літератури та постановка проблеми

Особливості та неоднозначність перебігу динамічних режимів в АД пов'язана з наявністю

© Бойко А. О., Найдено О. В., Савельєв А. А.,
Забродський С. М., 2025

вторинного контуру-обмотки ротора. За відсутності зовнішніх джерел живлення ланцюга ротора АД енергія ланцюга ротора забезпечується лише з допомогою трансформації її через повітряний зазор із боку статора [3]. Однак, енергія, яка внесена в ланцюг ротора і сконцентрована у формі енергії електромагнітного поля при порушеннях процесу, що встановився, починає грати самостійну роль, впливаючи на величину і форму переходного електромагнітного моменту. У цьому полягає подвійна роль ланцюга ротора в динамічних режимах [4]. Відповідно до принципу дії АД в режимі, що обертається, магнітний потік статора, що обертається, наводить електрорушійні сили (ЕРС) і струми в обмотці ротора і при взаємодії з цими струмами (або магнітним потоком ротора) створює електромагнітний момент [5, 2]. У режимі перетворення енергії, що встановився, зчеплені вектори потоків статора і ротора обертаються з однаковою синхронною швидкістю, але оскільки швидкість ротора менше швидкості поля, потік ротора «повзе» або «ковзає» по ротору. Взаємне просторове положення узагальнених векторів напруг, струмів і потоків добре візуалізується за допомогою векторних діаграм. Стрибокподібна зміна амплітуди або фази напруги живлення, опору в статорі або роторі, скидання або накидання навантаження, в результаті призводить АД до нового режиму, до нових амплітуд векторів і нових їх кутових положень [6]. Однак, відповідно до законів комутації, принципу суперпозиції та принципу

нерозривності поточкозчеплень незнеструмлених контурів після такого стрибка в роторі починають діяти дві системи струмів та магнітних потоків [7]. Одна відповідає умовам нового режиму. Інша визначається вільними складовими струмів та потоків, що виникли при стрибкоподібному впливі. Аналогічні процеси мають місце і в ланцюгах статора, але в роторі вони виражені більш чітко, існують більш тривалий час завдяки більшій електромагнітній інерційності і тому більш впливають на динаміку приводу. Тепер електромагнітне поле статора, що обертається, взаємодіє з двома магнітними полями ротора - новим усталеним, в результаті чого формується постійна складова моменту, і залишковим, що виникли як реакція на стрибкоподібну зміну умов, загасаючим, нерухомим відносно ротора полем, в результаті чого формується періодична, загасаюча складова моменту. Така картина перехідного процесу спостерігається при пуску з нульовими ПЕМУ або при повторних включеннях після деякої паузи.

Якщо статор АД відключається від джерела живлення, то в роторі залишається тільки одна система загасаючих струмів і потоків, нерухома щодо ротора і обертається разом з ним з його швидкістю. Ці відключення можуть відбуватися повністю або частково в окремих фазах, на малих інтервалах часу при комутації вентилів ТПН або великих при повному відключенні, але завжди нове включення викликає новий процес, цього разу вже з ненульовими ПЕМУ. В [9] показано, що при повторних включеннях з ненульовими ПЕМУ характер перехідного моменту (руховий або гальмівний) залежить від кута між узагальненими векторами магнітних потоків «нового» статора і «залишкового» ротора. Амплітуди векторів потоків визначають лише амплітуду перехідного моменту. Частота та постійна часу загасання вільних складових залежать від параметрів двигунів та швидкості ротора, на якому розглядається процес. Незважаючи на простоту, розглянута картина виникнення перехідних процесів багатьма дослідниками представляється недостатньо чітко. Наприклад, [10] про можливість виникнення перехідних моментів та їх інтенсивності судять не за величиною потоку в роторі, а за величиною ЕРС, що наводиться в статорі. В результаті можна зробити некоректні висновки про те, що затухаюче поле мало не впливає на електромагнітні перехідні процеси при низьких швидкостях двигуна.

2. Постановка проблеми та методи вирішення

При дослідженнях динамічних та енергетичних процесів в асинхронному електроприводі важливо враховувати, що:

- будь-які стрибкоподібні зміни керуючих або обурювальних впливів викликають в асинхронному електроприводі перехідний процес, що супроводжується збудженням перехідних струмів, магнітних потоків і моментів;

- інтенсивність перехідного процесу та момент, що при цьому розвивається, залежить від початкових ПЕМУ процесу; чим більше відрізняються ПЕМУ від умов режиму, тим сильніше виявляються перехідні процеси, незалежно від поточної швидкості ротора;

- мінімальні прояви перехідного моменту в будь-яких процесах будуть спостерігатися при плавній зміні керуючого впливу (кута включення вентилів і, відповідно, вихідної напруги перетворювача);

- мінімальні прояви перехідного моменту в будь-яких процесах будуть спостерігатися також при стрибкоподібному зміні управляючого впливу, якщо ПЕМУ в момент комутації близькі до електромагнітних умов нового режиму;

- при моделюванні процесу відключення однієї або декількох фаз обмотки статора, з метою правильного відображення поточних електромагнітних умов АД, слід суворо витримувати принцип нерозривності поточкозчеплення нерозімкнених і невідключених контурів.

У цій роботі розглядаються процеси, що протікають при вибігу АД і при переключенні на мережу з можливістю управління цими процесами. Дослідження проводилися методом математичного моделювання із застосуванням авторських моделей асинхронного електроприводу [11]. Для поставлених цілей дослідження асинхронний двигун представлявся з урахуванням узагальненої машини, що описується у системі координат α, β . У моделі вченого насичення стали по коліях головного магнітного потоку та шляхах розсіювання, також ефект витіснення струму в стрижнях обмотки ротора.

Завдання досліджень:

- оцінка впливу швидкості на процес підключення до мережі за нульових початкових електромагнітних умов;

- оцінка впливу ненульових ПЕМУ та визначення сприятливих та несприятливих умов підключення АД до мережі при ненульових ПЕМУ;

- оцінка впливу потужності двигуна на перехідні процеси підключення до мережі;

- аналіз форми та величини напруги на комутуючих елементах під час вибігу АД різної потужності та типовиконання.

3. Основний матеріал дослідження

3.1. Підключення двигуна до мережі з нульовими ПЕМУ

Підключенню до мережі передують робота пускового пристрою, тому має місце процес вибігу, протягом якого швидкість двигуна може значно знизитися, аж до повної зупинки [12]. Відносно великий час вибігу може також призводити до повного згасання магнітного потоку ротора. Тому граничним випадком підключення АД до електричної мережі є повторне включення з нульо-

вими ПЕМУ. На рис. 1 наведені осцилограми повторного включення АД при різних ковзаннях. З метою оцінки впливу потужності АД на перехідні процеси підключення до мережі аналіз проводився для двигунів трьох різної потужності 4, 55 і 315 кВт. Всі величини на осцилограмах представлені у відносних одиницях, де за базу прийняті номінальний момент, амплітуда номінального струму та синхронна швидкість двигуна. Оскільки найбільший інтерес представляють амплітуди струму і моменту в початковій фазі включення, на рис. 1 показані лише перші 10 періодів після включення.

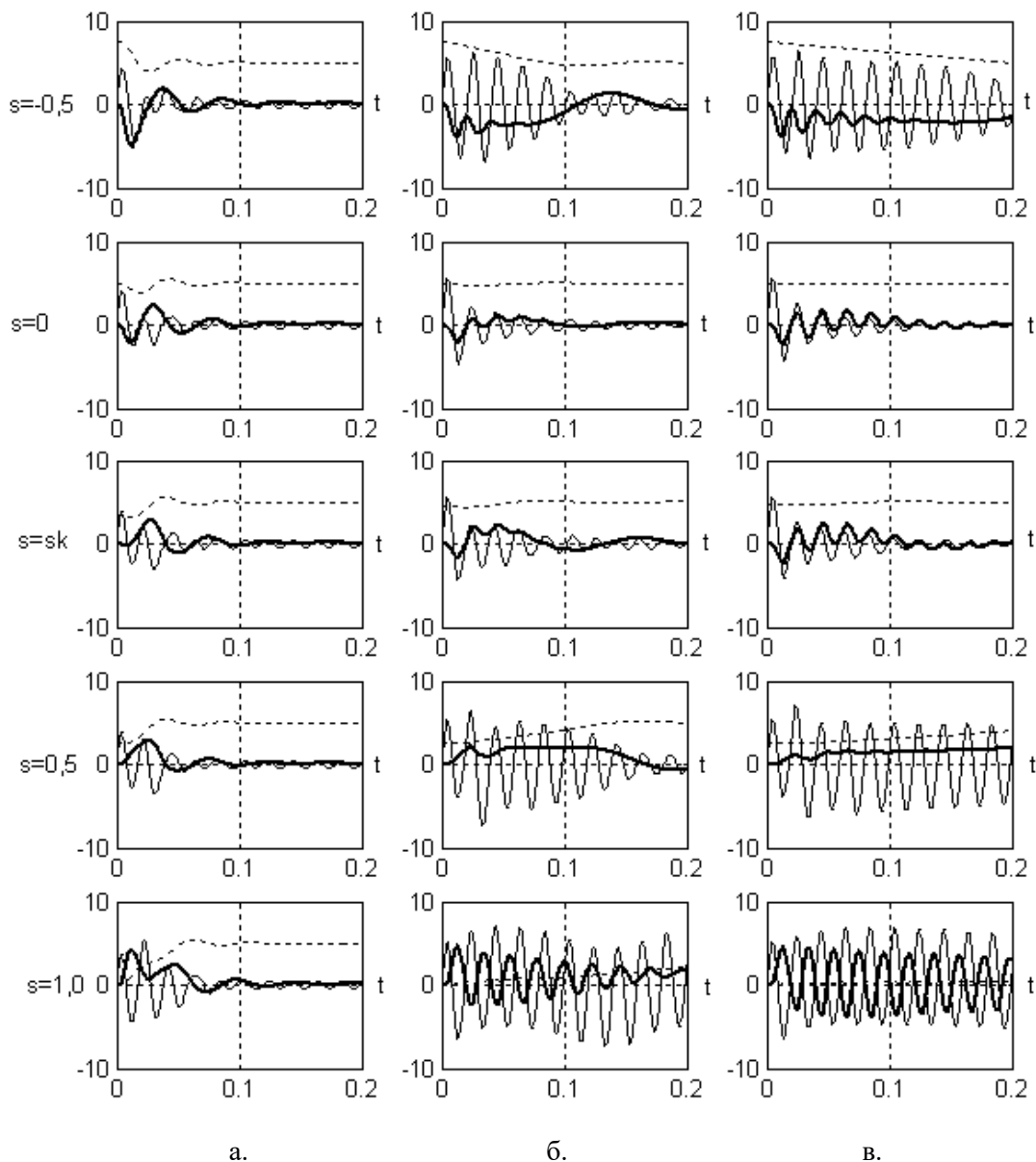


Рис. 1. Осцилограми повторного включення АД з нульовими ПЕМУ при ковзаннях від 1 до -0,5:
а - 4АМУ100L4, б - 4АМУ225M4, в - 4АМУ355M4;

----- кутова швидкість ротора;
— електромагнітний момент;
..... струм фази статора

За представленими осцилограмами можна зробити такі висновки. Найбільш сприятливі умови для підключення до мережі існують на робочій ділянці механічної характеристики від ковзання, близького до нуля до критичного. У цьому діапазоні у всіх двигунів формується коливальний загасаючий момент з амплітудою від $2M_n$ до $3M_n$. Час згасання електромагнітного моменту більше у двигунів більшої потужності. Амплітуди струму сягають 4-6 від амплітуди номінального струму. У всіх інших випадках формуються моменти та струми більшого значення, що сягають пускових значень при $s = 1$.

3.2. Підключення двигуна до мережі з нульовими ПЕМУ

Перемикання двигуна на мережу відбувається після завершення пуску і досягнення режиму, що встановився, з заданим моментом навантаження. Перед відключенням фіксуються кінцеві значення вектору потокозчеплення ротора і швидкості і вектору напруги мережі u . У всіх випадках режиму вектор потокозчеплення відстає від вектору напруги приблизно на 90 ел. град, а ЕРС статора на 180 ел. град. Уточнення просторового розташування вектору потокозчеплення, у разі, немає вирішального значення [13].

3.3. Перехідний процес вибігу АД

Зважаючи на те, що в електричному ланцюзі з активно-індуктивним навантаженням струм не можна змінити стрибком, накопичена в навантаженні електромагнітна енергія не може бути виведена миттєво, і спроби розриву ланцюга викликають перенапруги в місці розриву, які можуть виявитися небезпечними для обладнання [14]. Які особливості комутації таких ланцюгів? Контактної комутації сприяє електрична дуга, що виникає при розмиканні контакту, завдяки чому струм спадає не миттєво і перенапруження обмежені. При безконтактної комутації, коли ланцюг розривається досить швидко, застосовуються спеціальні схемотехнічні рішення у вигляді зворотних діодів, зворотних мостів і ємнісних накопичувачів енергії. Близьким до ідеального елемента, що комутує, є тиристор, що працює в режимі природної комутації. При зменшенні струму в ланцюзі до нуля він закривається, в принципі не викликаючи перенапруг в ланцюзі, що комутує.

Режим вибігу настає після відключення двигуна від мережі і є уповільненням двигуна під дією моменту навантаження і моменту механічних втрат. В АД у режимі вибігу, крім механічного процесу уповільнення, протікає електромаг-

нітний процес згасання магнітного потоку ротора. Магнітний потік ротора, що обертається, наводить в обмотках статора ЕРС. Сума миттєвих значень ЕРС і напруги мережі впливає на розімкнені контакти лінійного контактора або напівпровідникові прилади, які комутують, як показано для однієї з фаз на рис. 2.

Напруга мережі u_1 має стабільну частоту ω_0 , а ЕРС статора e_1 частоту обертання ротора ω . Складна форма сумарної напруги u_k , яку можна виміряти на розімкнутому контакті, причому вектори напруги мережі та ЕРС статора в процесі вибігу можуть багаторазово збігатися у напрямку або знаходитися в протифазі. У першому випадку до контакту прикладається максимальна напруга, а в другому - мінімальна.

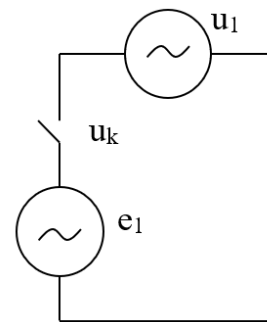


Рис. 2. Спрощена схема АД у режимі вибігу після відключення від мережі

Для контактної апарату ці напруги, можливо, не мають великого значення. Для напівпровідникових безконтактних приладів - тиристорів, транзисторів, величина максимальної напруги в закритому стані може виявитися критичною. Асинхронний двигун є багатофазним, багатоконтурним активно-індуктивним навантаженням. Електромагнітна енергія зосереджена в головному магнітному ланцюзі - контурі намагнічування, і в ланцюгах розсіювання магнітного потоку в статорі, і в роторі. При відключенні обмотки статора, коли її струм стає рівним нулю, зводиться до нуля лише енергія потоків розсіювання обмотування статора [9]. Решта електромагнітної енергії в момент комутації залишається незмінною і підтримується за рахунок струмів короткозамкненої обмотки ротора. Це означає, що комутується незначна частина повної електромагнітної енергії АД, зосереджена тільки в полях розсіювання статора обмотки. Саме цю енергію треба враховувати під час розрахунку спеціальних ємнісних фільтрів. Ця обставина так само дозволяє погоджувати між собою кінцеві електромагнітні умови перед відключенням і початкові електромагнітні умови режиму вибігу АД. Змінні рівняння потокозчеплення ротора для узагальне-

ної електричної машини, що описується в осях α , β , в момент відключення

$$\left. \begin{aligned} \psi_{2\alpha \text{ кін}} &= i_{2\alpha \text{ кін}} \cdot \frac{x_r}{\omega_0} + i_{1\alpha \text{ кін}} \cdot \frac{x_0}{\omega_0}, \\ \psi_{2\beta \text{ кін}} &= i_{2\beta \text{ кін}} \cdot \frac{x_r}{\omega_0} + i_{1\beta \text{ кін}} \cdot \frac{x_0}{\omega_0}; \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де x_r , x_0 - індуктивні опори ланцюга ротора та контуру намагнічування, Ом.

Приймаючи незмінним значення вектору потокозчеплення ротора в момент комутації, нове значення струму ротора, що є початковим для режиму вибігу при струмі статора, що дорівнює нулю

$$\left. \begin{aligned} i_{2\alpha \text{ поч}} &= \psi_{2\alpha \text{ кін}} \cdot \frac{\omega_0}{x_r}, \\ i_{2\beta \text{ поч}} &= \psi_{2\beta \text{ кін}} \cdot \frac{\omega_0}{x_r}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

а рівняння електричної рівноваги контурів статора та ротора матимуть вигляд

$$\left. \begin{aligned} u_{1\alpha} &= \frac{d\psi_{1\alpha}}{dt} + u_{k\alpha}, \\ u_{1\beta} &= \frac{d\psi_{1\beta}}{dt} + u_{k\beta}, \\ 0 &= i_{2\alpha} r_2 + \frac{d\psi_{2\alpha}}{dt} + \omega \psi_{2\beta}, \\ 0 &= i_{2\beta} r_2 + \frac{d\psi_{2\beta}}{dt} - \omega \psi_{2\alpha}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Рівняння потокозчеплень статора та ротора

$$\left. \begin{aligned} \psi_{1\alpha} &= i_{2\alpha} \frac{x_0}{\omega_0}, \quad \psi_{1\beta} = i_{2\beta} \frac{x_0}{\omega_0}; \\ \psi_{2\alpha} &= i_{2\alpha} \frac{x_r}{\omega_0}, \quad \psi_{2\beta} = i_{2\beta} \frac{x_r}{\omega_0}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Рівняння механічної рівноваги

$$0 - M_C = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt}. \quad (5)$$

Напруга на контакті знаходиться з рівняння електричної рівноваги контуру статора (3) за відомими миттєвими значеннями напруги живлення та ЕРС, що наводиться в статорі обмотці магнітним потоком ротора. Процес вибігу досліджувався відповідно до (3) - (5). Початкові електромагнітні умови процесу вибігу залежать від умов попереднього режиму, що встановився, а вони, у свою чергу, залежать від параметрів АД і навантаження на валу. Тому попередньо досліджувався процес пуску, а при настанні режиму фіксувалися значення потокозчеплення і швидкості ротора АД. Ці значення як початкові задавалися в інтеграторах моделі.

На початку перехідного процесу вектори напруги мережі та ЕРС статора практично знахо-

дяться у протифазі, тому початкова напруга на вентилі невелика (рис. 3). На осцилограмі напруги u_k ця ділянка називається вузлом. Далі вектори починають розходитися і напруга на контакті зростає, досягаючи максимуму, коли вектори починають збігатися. Ця ділянка називається пучністю. Слід зауважити, що на осцилограмах наведено проекції векторів напруги та ЕРС тільки на вісь α , тому за їх миттєвими значеннями візуально важко судити про збіг або розходження векторів.

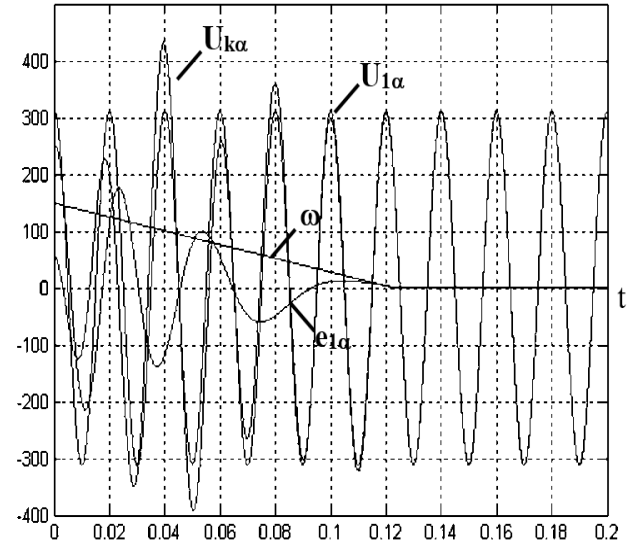


Рис. 3. Осцилограми режиму вибігу АД 4АМУ100L4, $J_{\Sigma} = 2 \text{ Дж}$, $M_c = M_n$

Наведена осцилограма знята для АД, навантаженого номінальним моментом. На вибігу відбувається інтенсивне гальмування з допомогою навантаження, і ЕРС статора також інтенсивно зменшується, переважно за рахунок зменшення швидкості.

У момент настання пучності максимальна напруга u_k становить 435 В. Наприкінці вибігу ЕРС статора дорівнює нулю, а напруга на контакті дорівнює напруги мережі. Значна кількість вузлів і пучностей має місце у разі вибігу в режимі холостого ходу, коли початкове потокозчеплення і швидкість ротора більше, а зменшення швидкості відбувається повільніше (рис. 4). У цьому прикладі ЕРС статора зменшується в основному за рахунок загасання потоку ротора, а не зменшення швидкості. Максимальна напруга на контакті тут не більша, ніж у попередньому випадку, оскільки момент пучності настає пізніше і до цього часу потік ротора значно згасає. На практиці таке поєднання початкових умов можливе, коли напруга на контакті буде максималь-

ною. Ці умови легше наступають для АД високої потужності, у яких завдяки більшій механічній та електромагнітній інерційності згасання та потоку, та швидкості відбувається набагато повільніше (рис. 5). Тут напруга на контакті досягає вже 525 В.

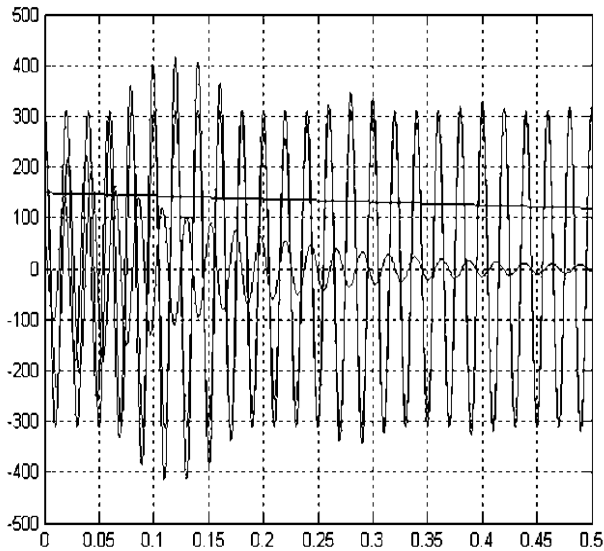


Рис. 4. Осцилограми режиму вибігу 4AMU100L4, $J\Sigma = 2\text{Jдв}$, $Mс = 0,05\text{Mн}$

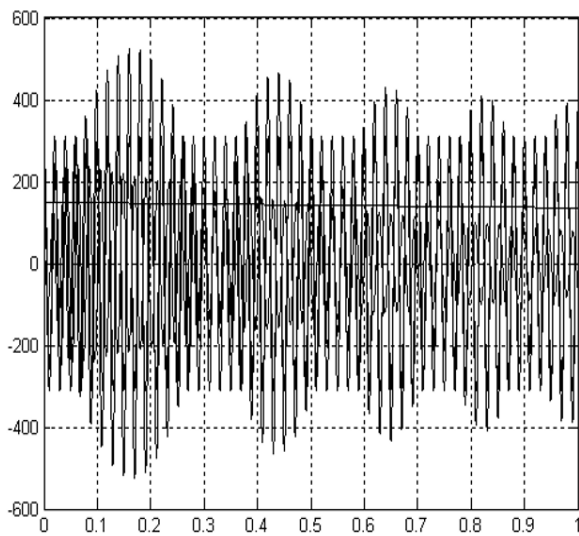


Рис. 5. Осцилограми режиму вибігу 4AMU225M4, $J\Sigma = 2\text{Jдв}$, $Mс = 0,05\text{Mн}$

Схожа картина може спостерігатися при відключенні від мережі частотно-регульованого електроприводу зі ланкою постійного струму та інвертором напруги. У разі, якщо відключення від мережі та закриття вентилів інвертора відбуваються одночасно, то до них прикладається сума лінійної випрямленої напруги фільтра U_{cf} і

загасаючої ЕРС статора. Слід зазначити, що математичний опис виконується щодо фазних величин АД [16]. Це справедливо при одночасному відключенні всіх трьох фаз та симетричному навантаженні. Можливі випадки неодночасного відключення фаз або, наприклад, випадок аварійного відключення АД при пробі одного з вентилів у фазі [1]. У таких умовах до розімкнутого контакту або закритого вентиля в інших фазах прикладається сума лінійних величин напруги мережі та ЕРС. При несприятливому поєднанні параметрів ця напруга в межі може досягати подвійної амплітуди лінійної напруги мережі.

4. Сприятливі та несприятливі умови підключення АД до мережі

У разі збігу результуючих трифазних векторів напруги мережі та ЕРС статора процес підключення буде проходити найбільш жорстко під дією суми напруги електричної мережі та ЕРС, з великими струмами, піками моменту та коливаннями швидкості. І навпаки, підключення АД до мережі в момент часу, коли вектори напруги мережі та ЕРС перебувають у протифазі, викличе м'якший перехідний процес. У цьому сенсі умови включення можна характеризувати як несприятливими чи сприятливими. Відповідно до картини напруги на контакті під час вибігу сприятливі умови включення відповідають вузлам, а несприятливі умови пучностям кривої напруги на контакті [17]. Ілюстрація перехідних процесів при сприятливих та несприятливих ПЕМУ наведена на рис. 3. Тут, на тлі графіка напруги на контакті, наводяться перехідні процеси, що відрізняються витримкою часу між відключенням і повторним включенням. Кожне з включень збігається з пучністю або з вузлом напруги на контакті. При підключенні момент пучності спостерігаємо десятикратні імпульси струму і десятикратні негативні імпульси моменту. При підключенні на момент настання вузла негативні імпульси моменту відсутні, амплітуди струму набагато менше.

5. Управління процесом повторного увімкнення з урахуванням можливостей контактної апаратури

Оцінку можливостей управління можна виконати, зіставляючи між собою тимчасові інтервали після відключення АД: постійну часу загасання ЕРС статора.

$$T_m = \frac{J_{\Sigma} \omega_0}{M_c} . \quad (6)$$

Механічна стала дорівнює часу гальмування електроприводу від синхронної швидкості до нуля під дією постійного моменту навантаження [8]. У таблиці 1 наведено зазначені величини для трьох аналізованих двигунів і двох характерних режимів - легкого (холостий хід з $M_c = 0,1M_n$) і важкого (робота під навантаженням з $M_c = M_n$). В усіх випадках враховується інерційність електроприводу $J_{\Sigma} = 1,1J_{\text{де}}$.

Аналіз результатів табл. 1 показує, що з використання перетворювача частоти для послідо-

вного пуску декількох АД необхідно враховувати, що:

- двигун можна розганяти до швидкості вище синхронної і, тим самим, компенсувати падіння швидкості за час настання сприятливих умов;

- проблема визначення сприятливих умов включення складніша. Після відключення двигуна від ПЧ на контакті апарата, що підключає до мережі, спостерігається та ж картина напруги, проте не синхронізована з моментом відключення, як це має місце при пуску від ТПН. У разі наступ вузлів напруги треба контролювати не розрахунковим, а апаратним способом.

Таблиця 1

Визначені величини динамічних режимів асинхронних двигунів

Двигун	Режим роботи	Постійні часу		Час настання вузлів напруги		Час спрацьовування контакторів	
		T_e , с	T_m , с	$T_{кз1}$, с	$T_{кз2}$, с	$T_{вим}$, с	$T_{вимк}$, с
4АМУ100L4, 4 кВт	$M_c=0,1M_n$	0,152	0,712	0,18	0,259	0,015	0,02
	$M_c=M_n$		0,0712	0,055	0,08		
4АМУ225M4, 55 кВт	$M_c=0,1M_n$	0,92	3,12	0,384	0,545	0,012	0,03
	$M_c=M_n$		0,312	0,118	0,169		
4АМУ355M4, 315 кВт	$M_c=0,1M_n$	1,33	5,97	0,532	0,754	0,07	0,07
	$M_c=M_n$		0,597	0,164	0,235		

Висновки

Аналіз напруги на комутуючих елементах при вибігу асинхронних двигунів різного типовиконання показав, що умови виникнення максимумів напруги на контакті частіше наступають для двигунів великої потужності з малим навантаженням на валу.

У всіх розглянутих випадках час появи вузла напруги на контакті більше часу спрацьовування контакторів, отже введенням додаткової витримки часу можна реалізувати сприятливі умови повторного включення.

Початкові умови більш сприятливі в режимі холостого ходу асинхронного двигуна, коли швидкість і ЕРС статора не встигають значно згаснути до моменту настання вузла.

При роботі електроприводу під навантаженням також можлива формальна реалізація сприятливих умов включення, проте при цьому за час появи першого вузла напруги на контакті, швидкість двигуна значно зменшується (двигун 4АМУ100L4 зменшує швидкість до $0,23\omega_0$, а двигун 4АМУ225M4 до $0,62\omega_0$) пусковий процес починається наново.

При експериментальному налагодженні режиму перемикання слід поєднувати появу струму статора в момент включення з вузлом напруги на контакті.

Список використаної літератури

- Gumilar, L., Afandi, A., N., Sujito; Faiz, M., R. (2021). Starting Induction Motor at Different Voltage Levels in the Electrical Power System. 2021 International Conference on Electrical and Information Technology (IEIT), 3251-3266. doi: 10.1109/IEIT53149.2021.9587354
- Xuesong, Z., Youjie, M., Zhiqiang G., Shaowei, Z. (2017). Reactive power compensation in motor. 2017 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), 1134-1151. doi: 10.1109/ICMA.2017.8015831
- Langlang, G., Dezetty, M., Mokhammad, S., Stieven, N., R. (2020). Transient in Electrical Power System under Large Induction Motor Starting Condition. 2020 2nd International Conference on Cybernetics and Intelligent System (ICORIS), 1-5. doi: 10.1109/ICORIS50180.2020.9320791
- Malyar, V., Hamola, O., Maday, V., Vasylychshyn, I. (2019) Static Characteristics of Asynchronous Motors with Series Reactive Power Compensation. 2019 9th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), 141-144. doi: 10.1109/ACITT.2019.8780064
- Wang, D., Zhao, J. (2020). Self-excitation Control of Squirrel-Cage Induction Motor based on

- Super-Twisting Sliding Mode Algorithm. 2020 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Information Systems (ICAIS), 500-504. doi: 10.1109/ICAIS49377.2020.9194868
6. Michaelides, A., Nicolaou, T. (2017). Starting and running the induction motor with a variable capacitor. 2017 14th International Conference on Engineering of Modern Electric Systems (EMES), 87-90. doi: 10.1109/EMES.2017.7980388
7. Guha, A., Narayanan, G. (2018). Impact of Undercompensation and Overcompensation of Dead-Time Effect on Small-Signal Stability of Induction Motor Drive. IEEE Transactions on Industry Applications, 1-1. doi: 10.1109/TIA.2018.2846719
8. Yin, S., Xia, J., Zhao, Z. (2020). Fast Restarting of Free-Running Induction Motors Under Speed-Sensorless Vector Control. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 67, 6124 – 6134. doi: 10.1109/TIE.2019.2934077
9. Wang, S., Lee, F., C., Wyk, J., D. (2016). Inductor winding capacitance cancellation using mutual capacitance concept for noise reduction application. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 48(2), 311-318. doi: 10.1109/TEMC.2006.873867
10. Ejiogu, E., C., Tanno, Y. (1993). Capacitor self-excitation braking of the induction motor. Proceedings of IECON Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, vol. 2, 891-895. doi: 10.1109/IECON.1993.339157
11. Boiko, A., A., Besarab, A., N., Sokolov, Y., A., Shapa, L., N. (2019). Improvement of Energy Indicators of Asynchronous Motor under the Conditions of Asymmetric Voltage Supply. Problemele Energeticii Regionale, no. 1–1 (40), 25–35. doi: 10.5281/zenodo.3239133
12. Lekhchine, S., Bahi, T., Laouar, I., Leulmi, R. (2023). Control and Optimization for a Photovoltaic Pumping System Using Induction Motor Vector Control. 14th International Renewable Energy Congress, 307-324. doi: 10.1109/IREC59750.2023.10389517
13. Andryushchko, O., A., Boiko, A., A. Analiz protsesov otklyucheniya ot seti I vybega asinkhronogo dvigatelya [Analysis of the processes of disconnection from the mains and coasting of an asynchronous motor]. – Elektromashinostroenie I elektrooborudovanie – Electrical engineering and electrical equipment, 2012, no. 69, pp. 28-31. (In Russian).
14. Sunal, C., E., Dyo, V., Velisavljevic, V. (2022). Review of Machine Learning Based Fault Detection for Centrifugal Pump Induction Motors. IEEE Access, vol. 10, 71344 – 71355. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3187718
15. Rao, Y., R. Current Based Restarting Method for Rotating Sensorless Induction Motor Drive. IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 38, 2239– 2242. doi: 10.1109/TEC.2023.3289065
16. Boiko, A., Naidenko, E., Besarab, A., Maevskaya, E. (2024). Study of Starting and Disconnecting Modes of an Asynchronous Electric Drive of a Centrifugal Pump. E-Journal «Problemele energeticii regionale», № 2 (62), 28 — 37. doi.org/10.52254/1857-0070.2024.2-62.03
17. Lee, K., Lukic, S., Sara, A. (2016). A universal restart strategy for induction machines. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 1344 – 1359. doi: 10.1109/ECCE.2016.7854802

References

- Gumilar, L., Afandi, A., N., Sujito; Faiz, M., R. (2021). Starting Induction Motor at Different Voltage Levels in the Electrical Power System. 2021 International Conference on Electrical and Information Technology (IEIT), 3251-3266. doi: 10.1109/IEIT53149.2021.9587354
- Xuesong, Z., Youjie, M., Zhiqiang G., Shaowei, Z. (2017). Reactive power compensation in motor. 2017 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), 1134-1151. doi: 10.1109/ICMA.2017.8015831
- Langlang, G., Dezetty, M., Mokhammad, S., Stieven, N., R. (2020). Transient in Electrical Power System under Large Induction Motor Starting Condition. 2020 2nd International Conference on Cybernetics and Intelligent System (ICORIS), 1-5. doi: 10.1109/ICORIS50180.2020.9]320791
- Malyar, V., Hamola, O., Maday, V., Vasylychshyn, I. (2019) Static Characteristics of Asynchronous Motors with Series Reactive Power Compensation. 2019 9th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), 141-144. doi: 10.1109/ACITT.2019.8780064
- Wang, D., Zhao, J. (2020). Self-excitation Control of Squirrel-Cage Induction Motor based on Super-Twisting Sliding Mode Algorithm. 2020 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Information Systems (ICAIS), 500-504. doi: 10.1109/ICAIS49377.2020.9194868
- Michaelides, A., Nicolaou, T. (2017). Starting and running the induction motor with a variable capacitor. 2017 14th International Conference on Engineering of Modern Electric Systems (EMES), 87-90. doi: 10.1109/EMES.2017.7980388

7. Guha, A., Narayanan, G. (2018). Impact of Undercompensation and Overcompensation of Dead-Time Effect on Small-Signal Stability of Induction Motor Drive. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1-1. doi: 10.1109/TIA.2018.2846719
8. Yin, S., Xia, J., Zhao, Z. (2020). Fast Restarting of Free-Running Induction Motors Under Speed-Sensorless Vector Control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 67, 6124 – 6134. doi: 10.1109/TIE.2019.2934077
9. Wang, S., Lee, F., C., Wyk, J., D. (2016). Inductor winding capacitance cancellation using mutual capacitance concept for noise reduction application. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 48(2), 311-318. doi: 10.1109/TEMC.2006.873867
10. Ejiogu, E., C., Tanno, Y. (1993). Capacitor self-excitation braking of the induction motor. *Proceedings of IECON Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*, vol. 2, 891-895. doi: 10.1109/IECON.1993.339157
11. Boiko, A., A., Besarab, A., N., Sokolov, Y., A., Shapa, L., N. (2019). Improvement of Energy Indicators of Asynchronous Motor under the Conditions of Asymmetric Voltage Supply. *Problemele Energeticii Regionale*, no. 1–1 (40), 25–35. doi: 10.5281/zenodo.3239133
12. Lekhchine, S., Bahi, T., Laouar, I., Leulmi, R. (2023). Control and Optimization for a Photovoltaic Pumping System Using Induction Motor Vector Control. *14th International Renewable Energy Congress*, 307-324. doi: 10.1109/IREC59750.2023.10389517
13. Andryushchko, O., A., Boiko, A., A. Analiz protsesov otklyucheniya ot seti I vybega asinkhronogo dvigatelya [Analysis of the processes of disconnection from the mains and coasting of an asynchronous motor]. – *Elektromashinostroenie I elektrooborudovanie – Electrical engineering and electrical equipment*, 2012, no. 69, pp. 28-31. (In Russian).
14. Sunal, C., E., Dyo, V., Velisavljevic, V. (2022). Review of Machine Learning Based Fault Detection for Centrifugal Pump Induction Motors. *IEEE Access*, vol. 10, 71344 – 71355. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3187718
15. Rao, Y., R. Current Based Restarting Method for Rotating Sensorless Induction Motor Drive. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 38, 2239– 2242. doi: 10.1109/TEC.2023.3289065
16. Boiko, A., Naidenko, E., Besarab, A., Maevskaya, E. (2024). Study of Starting and Disconnecting Modes of an Asynchronous Electric Drive of a Centrifugal Pump. *E-Journal «Problemele energeticii regionale»*, № 2 (62), 28 — 37. doi.org/10.52254/1857-0070.2024.2-62.03
17. Lee, K., Lukic, S., Sara, A. (2016). A universal restart strategy for induction machines. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 1344 – 1359. doi: 10.1109/ECCE.2016.7854802

Features of Formation of Dynamic Modes of Asynchronous Motors when Started from One Device

A. O. Boyko, O. V. Naidenko, A. A. Saveliev, S. M. Zabrodsky
Odessa National Polytechnic University

Abstract. The article solves the problem of forming dynamic modes of induction motors during starting from a single starting device. A mathematical description of the processes of disconnection from the power supply network and coasting of induction motors is performed. An analysis of the shape and magnitude of the voltage on the switching elements during coasting is carried out. An assessment of the influence of motor power on the transient processes of connection to the power supply network is given. Recommendations are given for ensuring favorable conditions for connecting induction motors to the power supply network, taking into account the capabilities of semiconductor starting devices and the use of contact equipment.

Keywords: dynamic modes, asynchronous motor, network connection, starting conditions, motor coasting, transient processes, initial electromagnetic conditions.

Отримано 28.02.2025



Бойко Андрій Олександрович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту, Національний університет «Одеська політехніка»; проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна.
E-mail: a.o.boyko@op.edu.ua; тел. +38 048 705 8581

Boiko Andrii, Dr. of Science, professor of Department of Electricity and Energy Management, Odessa National Polytechnic University; 1, Shevchenko Avenue, Odessa, 65044, Ukraine.
E-mail: a.o.boyko@op.edu.ua; ph.: +38 048 705 8581

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0048-9259>



Найденко Олена Валеріївна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту, Національний університет «Одеська політехніка»; проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна.
E - mail: avnaidenko@op.edu.ua; тел. +38 048 705 73 88

Naidenko Olena, PhD technical, associate professor, associate professor of Department of Electricity and Energy Management, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Avenue, Odessa, 65044, Ukraine. E-mail: avnaidenko@op.edu.ua, ph.: +38 048 705 85 48

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5684-5617>



Савельєв Артем Андрійович, PHD, старший викладач кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту, Національний університет «Одеська політехніка»; проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна.
E - mail: savieliev.a.a@op.edu.ua, тел. +38 048 705 85 48

Savieliev Artem, PhD, senior lecturer of Department of Electricity and Energy Management, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Avenue, Odessa, 65044, Ukraine.
E-mail: savieliev.a.a@op.edu.ua; ph.: +38 048 705 85 48

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6949-5959>



Заброцький Сергій Миколайович, аспірант кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту, Національний університет «Одеська політехніка»; проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна.
E - mail: zabroczkijoo@gmail.com, т. +38 048 705 85 48

Zabroczkij Serhiy, postgraduate student of Department of Electricity and Energy Management, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Avenue, Odessa, 65044, Ukraine.
E-mail: zabroczkijoo@op.edu.ua, т. +38 048 705 85 48

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7899-7150>

Дослідження економічної ефективності використання трансформаторів з еко-дизайном в електричних мережах об'єднаної енергетичної системи України

Я. О. Соколов, В. О. Суворов

Національний університет «Одеська політехніка»

Анотація. У статті досліджено економічну доцільність впровадження силових трансформаторів з еко-дизайном у розподільчих електричних мережах Об'єднаної енергетичної системи України. Особливу увагу приділено аналізу енергетичних втрат при експлуатації таких трансформаторів, що здійснено відповідно до методичних рекомендацій Міністерства енергетики та вугільної промисловості України.

Розрахунки проведено для трансформаторів типу ТМГ-1000/10 у різних режимах роботи, що дозволило визначити їх ефективність у реальних умовах експлуатації. Оцінювання економічної вигоди виконано на основі методу чистого дисконтного прибутку, що дало змогу порівняти потенційні фінансові переваги використання еко-дизайну з традиційними варіантами трансформаторного обладнання.

Аналіз показав, що, незважаючи на потенційне зниження втрат електроенергії, капітальні витрати на впровадження трансформаторів з еко-дизайном є значно вищими порівняно з традиційними моделями. Унаслідок цього, за сучасних економічних умов та тарифної політики, їх застосування в розподільчих електромережах Оператора системи розподілу не забезпечує достатнього економічного ефекту.

Отримані результати можуть бути корисними для енергетичних компаній, регуляторних органів та науковців при прийнятті рішень щодо модернізації електроенергетичної інфраструктури. Висновки дослідження також можуть слугувати підґрунтям для подальших наукових робіт, спрямованих на оптимізацію параметрів силових трансформаторів з урахуванням як енергетичних, так і фінансових показників.

Ключові слова: силові трансформатори, оператор системи розподілу, електрична мережа, експлуатація, експлуатація трансформаторів з еко-дизайном, чистий дисконтний прибуток.

Вступ

У зв'язку з реалізацією політики України в сфері енергозбереження, зокрема, у контексті переходу ринку електроенергії на нову модель, що передбачає більшу гнучкість та ефективність експлуатації, а також впровадження стимулюючого РAB-тарифоутворення в електричних мережах оператора системи розподілу, постає актуальне питання зменшення технологічних витрат в електричних мережах. Це питання є особливо важливим в умовах стрімкого зростання вартості електроенергії та необхідності забезпечення економічної ефективності в умовах обмежених ресурсів, що спонукає до постійного вдосконалення інфраструктури та технологій.

Особлива цінність суттєвого підвищення стандартів енергозбереження в Україні виникає в

контексті інтеграції національної енергосистеми до європейської об'єднаної енергосистеми ENTSO-E, що відкриває нові можливості для оптимізації енергетичних потоків, забезпечення надійності і стабільності постачання електроенергії та безпечної експлуатації діючих електроустановок, а також інтеграції відновлювальних джерел енергії та сучасних технологій зберігання енергії. Ці зміни потребують модернізації електричних мереж і підвищення їхньої ефективності експлуатації, що стає необхідною умовою для відповідності новим стандартам та вимогам європейського енергетичного ринку.

Важливою частиною цих зусиль є введення нових технічних стандартів для обладнання, зокрема, для силових трансформаторів. Зокрема, відповідно до постанови Кабінету Міністрів України № 152, було затверджено новий технічний регламент до вимог "Еко-дизайну" для силових трансформаторів потужністю до 3150 кВА та

© Соколов Я. О., Суворов В. О., 2025

напругою не більше 24 кВ. Цей регламент розроблено на основі Регламенту Комісії ЄС №548/2014 від 21.05.2014 року, що доповнює Директиву 2009/125/ЄС Європейського Парламенту [1, 2]. Введення цього регламенту спрямоване на забезпечення відповідності національних виробів високим європейським стандартам з енергоефективності та екологічності, що дозволить зменшити енергетичні витрати, знизити негативний вплив на навколишнє середовище та забезпечити більш стійку і ефективну роботу енергетичних систем.

Технічний регламент, що набув чинності 27 лютого 2019 року, є обов'язковим для виконання на території України. Згідно з ним, масляні трансформатори, які використовуються в електричних мережах, повинні відповідати затвердженим технічним параметрам "Еко-дизайну". Особливо важливою є вимога щодо масляних трансформаторів потужністю від 10 кВА до 3150 кВА, що випускаються серії ТМГ. Це гарантує не тільки підвищення технічних характеристик, а й зниження експлуатаційних витрат за рахунок зменшення технологічних втрат та підвищення ефективності роботи обладнання.

Контроль за відповідністю продукції цим вимогам здійснює Держпродспоживслужба, яка наглядає за дотриманням технічних параметрів, затверджених регламентом. У разі виявлення невідповідності технічним вимогам Еко-дизайну, служба має право заборонити використання або вилучити таке обладнання з обороту. Цей контроль є важливим елементом забезпечення належної якості та безпеки енергетичної інфраструктури, що сприяє сталому розвитку енергетичного сектора України та його інтеграції в європейське енергетичне співтовариство.

Економічний ефект полягає в зменшенні сплати активної потужності за технологічні витрати в трансформаторі при умові додаткових капітальних вкладень, оскільки енергозберігаючі трансформатори коштують дорожче.

1. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Вивчення економічної ефективності використання трансформаторів з еко-дизайном в електричних мережах є важливим напрямом сучасних наукових досліджень, оскільки це питання охоплює широкий спектр аспектів, від зменшення технологічних витрат до впровадження інноваційних рішень для збереження енергії та екологічної безпеки. В умовах глобальних викликів, пов'язаних із підвищенням попиту на енергоресурси, а також необхідності інтеграції енергосистем різних країн, питання оптимізації викорис-

тання енергетичних ресурсів стає надзвичайно актуальним.

Переробна промисловість споживає надмірну кількість матеріалів, переважно з первинних джерел і потоків енергії, що значно сприяє глобальним екологічним проблемам, таким як зміна клімату. Для досягнення сталого розвитку створення еко-дизайну та його впровадження у виробничому секторі має вирішальне значення [3].

Екологічні аспекти відіграють ключову роль у стимулюванні інноваційних підходів до розробки концепцій екологічного дизайну, сприяючи впровадженню новітніх технологій та матеріалів, що мінімізують негативний вплив на довкілля. Зростаючі вимоги до енергоефективності, зменшення викидів шкідливих речовин і раціональне використання ресурсів змушують науковців та інженерів шукати нові рішення, що відповідають принципам сталого розвитку [4]. Еко-дизайн, інтегруючи стійкі цінності в процес розробки продукту, враховує аспекти життєвого циклу при створенні продуктів, процесів або послуг [5].

Стратегія енергозбереження та зменшення викидів (ESER) є ключовим кроком для забезпечення стійкості обробної промисловості в умовах екологічного переходу. Вивчаючи поточні практики та обмеження ESER у цій галузі, у цьому документі пропонується новий підхід під назвою «економне енергозбереження та зменшення викидів» (LESER), який орієнтований на ефективне підвищення енергоефективності та скорочення викидів відходів [6].

В роботі [7] розповідається, що дизайнери володіють ключем до сталого розвитку продукту через EcoDesign. Існує безліч інструментів, розроблених для допомоги у досягненні цієї мети. Проте більшість з них використовуються рідко, в основному через відсутність вимог до сталого розвитку у специфікаціях продуктів. Якщо немає попиту на покращені екологічні характеристики, то відпадає й потреба в інструментах EcoDesign. Таким чином, відсутність ринкового попиту на екологічно чисті продукти є вирішальним чинником.

У статті [8] досліджуються та класифікуються інструменти, створені для оцінки екологічних вимог до продуктів та їх впровадження в процес розробки, за такими критеріями:

- 1) метод, застосований для екологічної оцінки;
- 2) додаткові вимоги до продукту, які необхідно інтегрувати разом з екологічними (багатокритеріальний підхід);
- 3) чи враховує інструмент усі етапи життєвого циклу продукту (перспектива життєвого циклу);

4) тип результатів (якісні чи кількісні);

5) етапи концептуального проектування, на яких можна використовувати цей інструмент;

6) основна методологія, що лежить в основі інтеграції цих вимог.

В роботі [9] йдеться мова про те, що у трансформаторів з екодизайном підвищення енергоефективності досягається за рахунок використання матеріалів з покращеними магнітними характеристиками та/або збільшенням маси основних компонентів. Це веде до підвищення їх кінцевої вартості, що, в свою чергу, позначається на зростанні цін на стандартну продукцію.

У статті [10] розповідається, що завданням розробників екопродуктів є забезпечення задоволення потреб або вигоди для споживача з мінімальними екологічними та економічними витратами. Для цього екологічні аспекти повинні бути інтегровані на етапі початкової розробки продукту, оскільки без цього екологічні вимоги не зможуть бути належним чином враховані

Як було зазначено раніше, навколишнє середовище стало основною проблемою після того, як традиційні підходи до розробки продуктів, орієнтовані на збільшення економічної вигоди, були піддані критиці. Однак в останні роки інструменти для сталого дизайну продуктів зазнали значних змін порівняно з тим, що існувало раніше. Вони трансформувалися з простих екодизайнерських інструментів у більш складні системи з розширеними можливостями, межами та застосуванням, спрямовані на реалізацію концепції сталого дизайну продукту [11].

Глобальна проблема зростаючих втрат електроенергії та негативного впливу енергетичного сектору на довкілля вимагає пошуку ефективних рішень, спрямованих на зменшення експлуатаційних витрат і скорочення викидів парникових газів. Одним із таких рішень є впровадження трансформаторів з еко-дизайном, які, завдяки використанню сучасних матеріалів з низькими втратами, удосконаленій конструкції магнітопроводів та інтеграції систем моніторингу стану обладнання, демонструють значні переваги в порівнянні з традиційними моделями. Їх підвищена енергоефективність дозволяє не лише мінімізувати негативний вплив на навколишнє середовище, а й сприяє досягненню цілей сталого розвитку.

Саме ці виклики сучасності зумовлюють необхідність детального вивчення економічної ефективності впровадження трансформаторів з екодизайном та їх ролі в оптимізації роботи електромереж.

2. Мета та задачі дослідження

Метою дослідження є визначення економічного ефекту від впровадження енергоефективних трансформаторів ТМГ зі зменшеними витратами, які виробляються підприємством-флагманом ТОВ «Укрелектроапарат».

Для досягнення мети дослідження необхідно:

1) розрахувати втрати електричної енергії в трансформаторі;

2) оцінити економічний ефект від встановлення трансформаторів з еко-дизайном.

3. Визначення втрат електричної енергії в трансформаторі

Розрахунок проводився для широко впровадженого трансформатора потужністю 1000 кВА, паспортні параметри якого наведені в таблиці 1.

Таблиця 1
Паспортні дані трансформаторів ТМГ
(ТОВ «УЕА»)

Тип трансформатора	U_k , %	$P_{кз}$, кВт	$P_{хх}$, кВт	Маса повна, кг	Вартість*, тис. грн
ТМГ-1000/10 (звичайні характеристики)	5,5	10,6	1,4	2570	250
ТМГ-1000/10 (зменшені витрати)	5,5	10,5	1,1	2730	335

* вартість на основі прайсової пропозиції заводу-виробника за червень 2022р.

Визначення технологічних витрат електроенергії проводилося у відповідності до Методичних рекомендацій визначення технологічних витрат електричної енергії в трансформаторах і лініях електропередач, затверджених наказом Міністерства енергетики та вугільної промисловості № 399 від 21.06.2013 [1, 2]. Дотримання зазначених методичних рекомендацій забезпечило коректність і порівнянність отриманих результатів із нормативними та галузевими вимогами, що є важливим для подальшого аналізу економічної доцільності впровадження нових технічних рішень у розподільчих електричних мережах.

Технологічні втрати в трансформаторі визначаються за формулою

$$\Delta W_T^{(P)} = 3I^2 R_T k_\phi^2 \cdot 10^{-3} T_p + P_{н.х} T_n, \quad (1)$$

де I^2 – середнє протягом розрахункового періоду діюче значення сили струму трансформатора, квадрат якого обчислюється за формулою (2);

k_ϕ^2 – коефіцієнт форми графіка навантаження трансформатора;

R_T – активний опір трансформатора, Ом;

$P_{н.х}$ – втрати неробочого ходу трансформатора, кВт;

T_p – час роботи трансформатора під навантаженням протягом розрахункового періоду, години;

T_n – час знаходження трансформатора під напругою протягом розрахункового періоду, години.

Квадрат середнього діючого значення сили струму в елементі електричної мережі протягом розрахункового періоду в обчислюють за формулою

$$I^2 = \frac{(W^{(P)})^2 + (W^{(Q)})^2}{bT^2 pU^2_H}, \quad (2)$$

де $W^{(P)}$, $W^{(Q)}$ – перетікання відповідно активної і реактивної енергії через елемент мережі за розрахунковий період, кВт·год. (кВАр·год.);

b – коефіцієнт, що дорівнює 3 для трифазної мережі і 1 для однофазної мережі;

U_H – номінальна вища напруга трансформатора згідно з ГОСТ 11677, кВ.

Визначення середньомісячного споживання електричної енергії проводиться так:

$$W^{(P)} = \frac{P_{p.3}}{12} T_{\max}, \text{ кВт} \cdot \text{год}, \quad (3)$$

$$W^{(Q)} = \frac{Q_{p.3}}{12} T_{\max}, \text{ кВАр} \cdot \text{год}, \quad (4)$$

де T_{\max} – час максимального навантаження в рік, який умовно приймається рівним 2000, 4000 та 6000 годин для одно-, дво- та тризмінного графіка навантаження відповідно, годин;

$P_{p.3}$, $Q_{p.3}$ – розрахункові активна та реактивна потужності, які визначаються із умови відповідності завантаження трансформатора на рівні

0,9 та 0,65 для одно- та двотрансформаторної підстанції, кВт, кВАр.

За формулами (3), (4) проведено розрахунок технологічних витрат електроенергії для однострансформаторної трансформаторної підстанції (ТП), яка функціонує відповідно до однозмінного графіка споживання електроенергії і становить

$$W^{(P)} = \frac{873}{12} \cdot 2000 = 145,5 \text{ тис. кВт} \cdot \text{год},$$

$$W^{(Q)} = \frac{218,3}{12} \cdot 2000 = 36,38 \text{ тис. кВАр} \cdot \text{год}.$$

Так, за формулою (2) квадрат середнього діючого значення сили струму в трансформаторі протягом розрахункового періоду становить для однострансформаторної ТП, працюючої за однозмінним графіком навантаження дорівнює

$$I^2 = \frac{145500^2 + 36380^2}{3 \cdot 720^2 \cdot 10^2} = 136,1 \text{ А}^2.$$

За формулою (1) середньомісячні втрати активної енергії в трансформаторі складатимуть

$$\Delta W_T^{(P)} = 3 \cdot 136,1 \cdot 1,06 \cdot 1,48 \cdot 720 / 1000 + \dots \rightarrow$$

$$\leftarrow \dots + 1,4 \cdot 720 = 1469,3 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Розрахунок технологічних витрат електроенергії проводився для різних режимів роботи трансформатора, що дозволило оцінити зміну втрат залежно від навантаження та експлуатаційних умов. У дослідженні враховувалися як холості втрати, так і втрати короткого замикання, що дало змогу отримати повну картину енергетичної ефективності трансформаторів.

Результати розрахунків для трансформатора зі стандартними характеристиками наведені в таблиці 2, де детально відображено величини втрат електроенергії у різних режимах його роботи. Зокрема, в таблиці представлені значення холостих втрат, втрат короткого замикання, а також сумарні технологічні витрати електроенергії при різних рівнях навантаження.

Аналіз отриманих даних дозволяє оцінити, як змінюються втрати електроенергії залежно від експлуатаційних умов, зокрема від рівня завантаженості трансформатора.

Таблиця 2

Результати розрахунку технологічних витрат в трансформаторі зі стандартними характеристиками

Режим	Параметри навантаження трансформатора					Середньомісячне споживання			Середньомісячні витрати	
	P_p , кВт	Q_p , кВАр	T_{\max} , год	β_T	K_Φ^2	W_a , тис. кВт*год	W_p , тис. кВАр*год	I^2 , А	dW_a , кВт*год	dW_a , %
Трансформатор ТМГ-1000 зі стандартними характеристиками										
1 трансформаторна ТП однозмінний графік	873	218,3	2000	0,9	1,48	145,5	36,38	136,13	1469,3	1,01
1 трансформаторна ТП двозмінний графік	873	218,3	4000	0,9	1,27	291	72,75	544,54	2591,4	0,89
1 трансформаторна ТП тризмінний графік	873	218,3	6000	0,9	1,02	436,5	109,13	1225,21	3869,3	0,89
2 трансформаторна ТП однозмінний графік	630,5	157,6	2000	0,65	1,48	105,08	26,27	71	1248,6	1,19
2 трансформаторна ТП двозмінний графік	630,5	157,6	4000	0,65	1,27	210,17	52,54	284,04	1833,9	0,87
2 трансформаторна ТП тризмінний графік	630,5	157,6	6000	0,65	1,02	315,25	78,81	639,07	2500,5	0,79

Для трансформатора з покращеними характеристиками, зокрема зі зменшеними технологічними витратами, результати розрахунків наведені в таблиці 3.

У ній представлено детальні значення втрат електроенергії у різних режимах роботи.

Особливу увагу приділено порівнянню показників із трансформатором зі стандартними характеристиками, що дозволяє оцінити ефективність заходів, спрямованих на зменшення технологічних витрат.

У розрахунках враховано вплив модернізованих конструктивних рішень, таких як покращені магнітопроводи, використання провідників з нижчим електричним опором та оптимізація режимів роботи.

Отримані результати можуть слугувати основою для подальшого аналізу економічної доцільності використання трансформаторів із покращеними характеристиками в розподільчих електромережах, оскільки вони надають детальну інформацію щодо зниження технологічних втрат електроенергії в різних умовах експлуатації. Цей аналіз є ключовим для обґрунтування можливості підвищення ефективності функціонування електричних мереж за допомогою модернізованого трансформаторного обладнання.

Зокрема, отримані дані дозволяють обґрунтувати можливість зниження експлуатаційних витрат за рахунок зменшення втрат електроенергії.

Результати розрахунку технологічних витрат в трансформаторі зі зменшеними витратами

Режим	Параметри навантаження трансформатора					Середньомісячне споживання			Середньомісячні витрати	
	P_p , кВт	Q_p , кВАр	T_{\max} , год	β_T	K_Φ^2	W_a , тис. кВт*год	W_p , тис. кВАр*год	I^2 , А	dW_a , кВт*год	dW_a , %
Трансформатор ТМГ-1000 зі зменшеними витратами										
1 трансформаторна ТП однозмінний графік	873	218,3	2000	0,9	1,48	145,5	36,38	136,1	1248,9	0,86
1 трансформаторна ТП двозмінний графік	873	218,3	4000	0,9	1,27	291	72,75	544,5	2360,5	0,81
1 трансформаторна ТП тризмінний графік	873	218,3	6000	0,9	1,02	436,5	109,13	1225,2	3626,4	0,83
2 трансформаторна ТП однозмінний графік	630,5	157,6	2000	0,65	1,48	105,08	26,27	71	1030,3	0,98
2 трансформаторна ТП двозмінний графік	630,5	157,6	4000	0,65	1,27	210,17	52,54	284	1610,1	0,77
2 трансформаторна ТП тризмінний графік	630,5	157,6	6000	0,65	1,02	315,25	78,81	639,1	2270,4	0,72

З метою оцінки ефективності впровадження трансформаторів із зменшеними втратами проведено порівняння основних показників енергетичних витрат, яке відображене в таблиці 4. Це порівняння має на меті оцінити вплив модернізації трансформаторів на зниження загальних втрат електричної енергії в електричних мережах, що дозволяє обґрунтовано порівняти два типи трансформаторів — зі стандартними та покращеними характеристиками. Порівняння включає детальний аналіз втрат електричної енергії для кожного типу трансформатора у різних режимах роботи. Це дозволяє виявити відмінності в рівнях втрат за умов номінального навантаження, коли трансформатор працює в оптимальному режимі, а також при частковому навантаженні, коли трансформатор працює при знижених навантаженнях.

Виконання цього порівняння дозволяє детально оцінити вплив покращених характеристик на зменшення втрат в кожному з режимів.

4. Визначення економічного ефекту

Чистий дисконтний прибуток (ЧДП) визначається як сума поточних ефектів за весь розрахунковий період, приведена до початкового кроку, або як перевищення інтегральних резуль-

Порівняння витрат в трансформаторах

Режим	Трансформатор зі стандартними витратами	Трансформатор зі зменшеними витратами	Різниця	
	Середньомісячні витрати dWa, кВт*год	Середньомісячні витрати dWa, кВт*год	dWa, кВт*год	dWa, грн/міс
1 трансформаторна ТП однозмінний графік	1469,3	1248,9	220,4	771,4
1 трансформаторна ТП двозмінний графік	2591,4	2360,5	230,9	808,15
1 трансформаторна ТП тризмінний графік	3869,3	3626,4	242,9	850,15
2 трансформаторна ТП однозмінний графік	1248,6	1030,3	218,3	764,05
2 трансформаторна ТП двозмінний графік	1833,9	1610,1	223,8	783,3
2 трансформаторна ТП тризмінний графік	2500,5	2270,4	230,1	805,35

над інтегральними витратами:

$$NPV = \sum_{t=0}^T ((R_t - B_t) / (1 + E)^t), \text{ грн}, \quad (5)$$

де R – прибуток за t -років;

B – річні витрати за t -років;

K_t – капітальні вкладення в році t ;

E – норма дисконтування (приймається у відповідності до розрахункової ставки НБУ за червень 2022 року на рівні 25%).

Період окупності проекту T_n - період за який віддачі на капітал досягає значення дисконтованих початкових вкладень. Період окупності визначають за такою формулою

$$NPV = \sum_{t=0}^{T_n} ((R_t - B_t) / (1 + E)^t) = 0. \quad (6)$$

Внутрішня норма прибутку IRR характеризує рентабельність проекту і визначається наступним чином:

$$IRR = 1/T, \% \quad (7)$$

де T_n – термін окупності.

Під час виконання економічного розрахунку основні показники визначались так:

– капітальні витрати: як різницю між вартістю трансформатора зі стандартними та поліпшеними характеристиками;

– доход від енергозбереження: як різницю між щорічною вартістю витрат з урахуванням щорічного подорожчання електроенергії на 5%;

– щорічні витрати: як амортизаційні витрати (на рівні 4%) помножені на різницю вартості трансформаторів.

Оскільки за даними розрахунків різниця економічного ефекту для різних видів трансформаторів незначна, то ЧДП розраховується для найбільш та найменш вигідних режимів.

В таблицях 5 та 6 наводяться результати розрахунку NVP для найгіршого та найліпшого варіанта.

5. Результати дослідження

За результатами проведених розрахунків було отримано такі висновки щодо економічної доцільності встановлення трансформаторів зі зменшеними витратами від ТОВ «Укрелектроапарат» для споживачів різних класів напруги:

– аналіз фінансових показників показав, що впровадження трансформаторів зі зниженими витратами для підприємств, які належать до 2 класу напруги, не є економічно виправданим. Внутрішній коефіцієнт рентабельності (IRR) для

таких підприємств становить -22%, що свідчить про значний економічний ризик та неможливість

Таблиця 5

Розрахунок NVP для двотрансформаторної ТП з однозмінним графіком навантаження
(найгірший варіант)

Роки розрахункового періоду	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Капітальні витрати К, тис грн	85										
Доход від енергозбереження R, тис грн		9,2	9,6	10,1	10,6	11,1	11,7	12,3	12,9	13,6	14,2
Щорічні витрати С, тис грн		3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4
Прибуток	-85	5,8	6,2	6,7	7,2	7,7	8,3	8,9	9,5	10,1	10,8
Кумулятивний прибуток, тис. грн	-85	-79	-73	-66	-59	-51	-43	-34	-25	-1	-3,7
Коефіцієнт дисконтування	1	0,80	0,64	0,51	0,41	0,33	0,26	0,21	0,17	0,13	0,11
Дисконтований прибуток, тис. грн	-85	4,61	3,98	3,43	2,95	2,54	2,18	1,86	1,59	1,36	1,16
$NVP = \sum (R-C) \cdot (1+E)^{-t}$	-85	-80,4	-76,4	-73,0	-70,0	-67,5	-65,3	-63,4	-61,8	-60,5	-59,3

Таблиця 6

Розрахунок NVP для однострансформаторної ТП з тризмінним графіком навантаження
(найліпший варіант)

Роки розрахункового періоду	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Капітальні витрати К, тис грн	85										
Доход від енергозбереження R, тис грн		9,66	10,2	10,7	11,2	11,8	12,3	13	13,6	14,3	15
Щорічні витрати С, тис грн		3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4
Прибуток	-85	6,3	6,7	7,3	7,8	8,3	8,9	9,6	10,2	10,9	11,6
Кумулятивний прибуток, тис. грн	-85	-78,7	-72,0	-64,7	-56,9	-48,6	-39,7	-30,1	-19,9	-9,0	2,6
Коефіцієнт дисконтування	1	0,8	0,64	0,51	0,41	0,33	0,26	0,21	0,17	0,13	0,11
Дисконтований прибуток, тис. грн	-85	5,01	4,32	3,71	3,19	2,74	2,34	2,00	1,71	1,46	1,24
$NVP = \sum (R-C) \cdot (1+E)^{-t}$	-85	-80,0	-75,7	-72,0	-68,8	-66,0	-63,7	-61,7	-60,0	-58,5	-57,3

повернення інвестицій у встановлення цього обладнання. Від'ємне значення IRR означає, що очікувані економічні вигоди не компенсують витрат на придбання та експлуатацію трансформаторів, що робить їх використання нерентабельним у даних умовах;

– у випадку споживачів 1 класу напруги ситуація виглядає дещо краще: економічні показники демонструють покращення порівняно з підприємствами 2 класу. Проте, незважаючи на це покращення, рівень фінансової доцільності все ще залишається недостатнім для того, щоб обґрунтувати широкомасштабне впровадження даних трансформаторів. Отримані розрахунки показують, що навіть за сприятливіших умов для підприємств 1 класу інвестиції у такі трансформатори не дають бажаного рівня прибутковості. Таким чином, без додаткових стимулюючих факторів, таких як державні субсидії, зменшення вартості обладнання або введення пільгових тарифів на електроенергію для енергоефективного обладнання, впровадження трансформаторів зі зниженими втратами для споживачів 1 класу залишається фінансово невиправданим;

– аналіз вартості трансформаторів у різних режимах роботи показав, що різниця у витратах не перевищує 11,3%. Основним чинником, що впливає на цю незначну варіацію, є відмінність у втраті короткого замикання (Ркз) між різними моделями силових трансформаторів. Це означає, що, незважаючи на впровадження трансформаторів зі зниженими втратами, кінцевий економічний ефект залишається відносно малим через незначну різницю у витратах на експлуатацію обладнання.

На рисунках 1 – 4 наведені графіки NPV та кумулятивного прибутку для двотрансформаторної ТП.

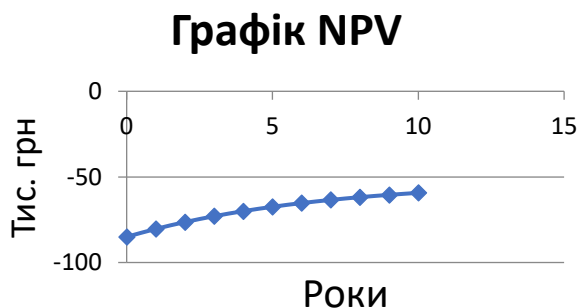


Рис. 1. Графік NPV для двотрансформаторної ТП з однозмінним графіком навантаження

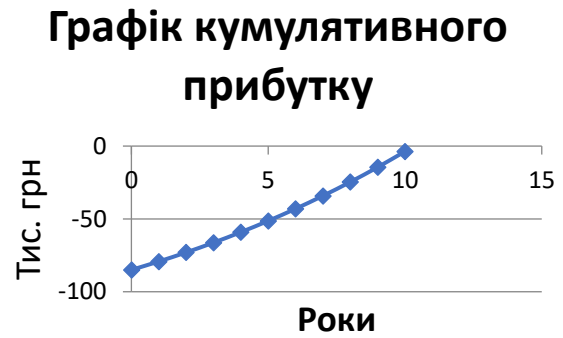


Рис. 2. Графік кумулятивного прибутку для двотрансформаторної ТП з однозмінним графіком навантаження

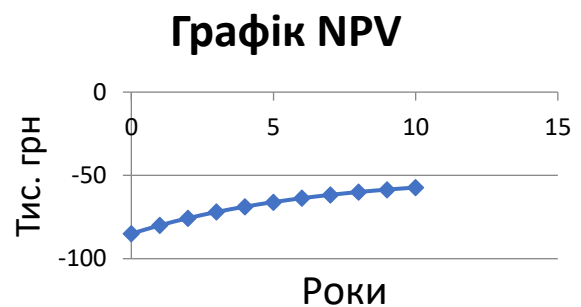


Рис. 3. Графік NPV для однострансформаторної ТП з тризмінним графіком навантаження

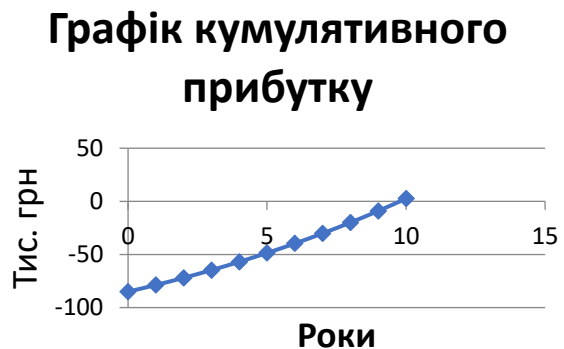


Рис. 4. Графік кумулятивного прибутку для однострансформаторної ТП з тризмінним графіком навантаження

6. Висновки

Результати проведеного аналізу свідчать про те, що в поточних економічних умовах застосування трансформаторів з еко-дизайном є фінансово невиправданим. Висока початкова вартість таких трансформаторів призводить до того, що їх окупність не досягається протягом 10-річного

періоду експлуатації незалежно від рівня навантаження. Це створює серйозні бар'єри для їх впровадження у розподільні електричні мережі та промислові підприємства.

Основною причиною незадовільних економічних показників є значне зростання масогабаритних параметрів трансформаторів, що безпосередньо впливає на їхню кінцеву вартість.

У конструктивному рішенні для зменшення витрат холостого ходу було використано метод збільшення маси магнітопроводу на 470 кг та об'єму трансформаторного масла на 480 кг. Проте така стратегія не передбачала застосування високоефективних марок сталі з покращеними магнітними властивостями, що могло б суттєво знизити втрати без значного збільшення маси трансформатора. Таким чином, вибір технологічного підходу до зниження витрат холостого ходу виявився неефективним з точки зору економіки виробництва та експлуатації.

Згідно з технічним регламентом, параметри силових трансформаторів з еко-дизайном суттєво відрізняються за рівнем витрат холостого ходу, однак мають лише незначні (менше 1%) відмінності у витратах короткого замикання. Це є критичним фактором, оскільки у розподільних електромережах витрати короткого замикання є значно вищими за втрати холостого ходу. Особливо це стосується навантажених підстанцій, де основна частка втрат припадає саме на режим роботи під навантаженням.

Аналіз режимів експлуатації показує, що у мережах ОСР (операторів системи розподілу) значна кількість одотрансформаторних підстанцій, де навантажувальні втрати короткого замикання відіграють значно більшу роль, ніж витрати холостого ходу. Водночас, у двотрансформаторних підстанціях, особливо при низьких навантаженнях, частка витрат холостого ходу є вищою. Це вказує на необхідність гнучкого підходу до розробки трансформаторів з еко-дизайном, які б мали різне співвідношення витрат холостого ходу та короткого замикання. Такий підхід дозволить підвищити енергоефективність обладнання у залежності від специфічних умов експлуатації.

Щодо забезпечення економічної доцільності впровадження трансформаторів ТМГ-1000/10 з еко-дизайном, розрахунки показують, що їхня окупність може бути досягнута лише за умови застосування високого коефіцієнта дисконтування (10%) та вартості електроенергії на рівні 9 грн/кВт·год. Такий сценарій є малоімовірним у поточних умовах ринку електроенергії та не відповідає тарифним реаліям для більшості споживачів.

Окремо слід зазначити, що економічний ефект від використання трансформаторів з еко-дизайном у мережах ОСР буде ще гіршим. Це пояснюється тим, що вартість електроенергії для ОСР не включає тариф на розподіл, що значно знижує потенційний економічний зиск від зменшення втрат. Відповідно, ОСР будуть менш зацікавлені у впровадженні таких трансформаторів через низьку фінансову віддачу від їх експлуатації.

Отримані результати вказують на необхідність подальшого вдосконалення технологічних параметрів трансформаторів для досягнення більш вираженого економічного ефекту, що може зробити їх привабливішими для споживачів у майбутньому.

Список використаної літератури

1. Постанова Кабінету Міністрів України № 152 від 27.02.19 «Про затвердження Технічного регламенту щодо вимог до екодизайну для малих, середніх та великих силових трансформаторів».

2. Наказ № 399 від 21.06.2013 «Про Методичні рекомендації визначення технологічних витрат електричної енергії в трансформаторах і лініях електропередавання».

3. S. Kamalakkannan, A.K. Kulatunga (2021). Optimization of eco-design decisions using a parametric life cycle assessment. *Sustainable Production and Consumption*, Volume 27, Pages 1297-1316, ISSN 2352-5509, <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.03.006>.

4. C.K.M. Lee, Jingying Liang, K.L. Yung, K.L. Keung (2024). Generating TRIZ-inspired guidelines for eco-design using Generative Artificial Intelligence. *Advanced Engineering Informatics*, Volume 62, Part C, 102846, ISSN 1474-0346, <https://doi.org/10.1016/j.aei.2024.102846>.

5. William Z. Bernstein, Melissa Tensa, Maxwell Praniewicz, Soonjo Kwon, Devarajan Ramanujan (2020). An automated workflow for integrating environmental sustainability assessment into parametric part design through standard reference models. *Procedia CIRP*, Volume 90, Pages 102-108, ISSN 2212-8271, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.058>.

6. Michael P. Brundage, William Z. Bernstein, Steven Hoffenson, Qing Chang, Hidetaka Nishi, Timothy Kliks, K.C. Morris (2018). Analyzing environmental sustainability methods for use earlier in the product lifecycle. *Journal of Cleaner Production*, Volume 187, Pages 877-892, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.187>.

7. Wei Cai, Kee-hung Lai, Conghu Liu, Fangfang Wei, Minda Ma, Shun Jia, Zhigang Jiang, Li Lv (2019). Promoting sustainability of manufacturing industry through the lean energy-saving and emission-reduction strategy. *Science of The Total Environment*, Volume 665, Pages 23-32, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.069>.

8. M.D. Bovea, V. Pérez-Belis, A taxonomy of ecodesign tools for integrating environmental requirements into the product design process, *Journal of Cleaner Production*, Volume 20, Issue 1, 2012, Pages 61-71, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.07.012>.

9. М. Р. Іщенко, О. А. Козловський (2024). Підвищення енергетичної ефективності трансформаторних підстанцій 10/0, 4 кВ. https://repo.btu.kharkov.ua/bitstream/123456789/59395/1/EE_tekhnolohiyi_APK_2024_17-18.pdf

10. Conrad Luttrupp, Jessica Lagerstedt (2006). EcoDesign and The Ten Golden Rules: generic advice for merging environmental aspects into product development. *Journal of Cleaner Production*, Volume 14, Issues 15–16, Pages 1396-1408, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2005.11.022>.

11. Shamraiz Ahmad, Kuan Yew Wong, Ming Lang Tseng, Wai Peng Wong (2018). Sustainable product design and development: A review of tools, applications and research prospects, *Resources, Conservation and Recycling*, Volume 132, Pages 49-61, ISSN 0921-3449, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.01.020>.

References

1. Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 152 dated 27.02.19 "On Approval of the Technical Regulation Regarding Requirements for Eco-design for Small, Medium, and Large Power Transformers."

2. Order No. 399 dated 21.06.2013 "On Methodical Recommendations for Determining Technological Losses of Electrical Energy in Transformers and Power Transmission Lines."

3. S. Kamalakkannan, A.K. Kulatunga (2021). Optimization of eco-design decisions using a parametric life cycle assessment. *Sustainable Production and Consumption*, Volume 27, Pages 1297-1316, ISSN 2352-5509, <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.03.006>.

4. C.K.M. Lee, Jingying Liang, K.L. Yung, K.L. Keung (2024). Generating TRIZ-inspired guidelines for eco-design using Generative Artificial

Intelligence. *Advanced Engineering Informatics*, Volume 62, Part C, 102846, ISSN 1474-0346, <https://doi.org/10.1016/j.aei.2024.102846>.

5. William Z. Bernstein, Melissa Tensa, Maxwell Praniewicz, Soonjo Kwon, Devarajan Ramanujan (2020). An automated workflow for integrating environmental sustainability assessment into parametric part design through standard reference models. *Procedia CIRP*, Volume 90, Pages 102-108, ISSN 2212-8271, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.058>.

6. Michael P. Brundage, William Z. Bernstein, Steven Hoffenson, Qing Chang, Hidetaka Nishi, Timothy Kliks, K.C. Morris (2018). Analyzing environmental sustainability methods for use earlier in the product lifecycle. *Journal of Cleaner Production*, Volume 187, Pages 877-892, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.187>.

7. Wei Cai, Kee-hung Lai, Conghu Liu, Fangfang Wei, Minda Ma, Shun Jia, Zhigang Jiang, Li Lv (2019). Promoting sustainability of manufacturing industry through the lean energy-saving and emission-reduction strategy. *Science of The Total Environment*, Volume 665, Pages 23-32, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.069>.

8. M.D. Bovea, V. Pérez-Belis, A taxonomy of ecodesign tools for integrating environmental requirements into the product design process, *Journal of Cleaner Production*, Volume 20, Issue 1, 2012, Pages 61-71, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.07.012>.

9. М. Р. Іщенко, О. А. Козловський (2024). Improvement of Energy Efficiency of 10/0.4 kV Transformer Substations. https://repo.btu.kharkov.ua/bitstream/123456789/59395/1/EE_tekhnolohiyi_APK_2024_17-18.pdf

10. Conrad Luttrupp, Jessica Lagerstedt (2006). EcoDesign and The Ten Golden Rules: generic advice for merging environmental aspects into product development. *Journal of Cleaner Production*, Volume 14, Issues 15–16, Pages 1396-1408, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2005.11.022>.

11. Shamraiz Ahmad, Kuan Yew Wong, Ming Lang Tseng, Wai Peng Wong (2018). Sustainable product design and development: A review of tools, applications and research prospects, *Resources, Conservation and Recycling*, Volume 132, Pages 49-61, ISSN 0921-3449, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.01.020>.

Research on the Economic Efficiency of using Eco-Designed Transformers in the Electric Grids of the Unified Energy System of Ukraine

Ya. O. Sokolov, V. O. Suvorov
Odessa Polytechnic National University

Abstract. The article investigates the economic feasibility of implementing eco-designed power transformers in the distribution electricity networks of Ukraine's Unified Energy System. Special attention is given to the analysis of energy losses during the operation of such transformers, which was carried out in accordance with the methodical recommendations of the Ministry of Energy and Coal Industry of Ukraine.

Calculations were made for TMH-1000/10 type transformers in various operational modes, allowing for the assessment of their performance under real-world operating conditions. The economic benefits were evaluated using the net present value (NPV) method, which made it possible to compare the potential financial advantages of using eco-design with traditional transformer equipment options.

The analysis showed that, despite the potential reduction in energy losses, the capital expenditures for implementing eco-designed transformers are significantly higher compared to traditional models. As a result, under current economic conditions and tariff policies, their application in the distribution networks of the Distribution System Operator does not provide sufficient economic benefit.

The obtained results may be useful for energy companies, regulatory authorities, and researchers when making decisions regarding the modernization of the electric power infrastructure. The conclusions of the study could also serve as a foundation for further scientific work aimed at optimizing the parameters of power transformers, taking into account both energy and financial indicators.

Keywords: Power Transformers, Distribution System Operator, Electrical Grid, Operation, Operation of Eco-Designed Transformers, Net Present Value (NPV)

Отримано 09.04.2025



Соколов Ярослав Олександрович, старший викладач кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту, Національний університет «Одеська політехніка»; проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна.

E-mail: sokolov@op.edu.ua, тел. +38 098 955 60 41

Yaroslav Sokolov, senior lecture of Department of Electricity and Energy Management, Odessa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Avenue, Odessa, 65044, Ukraine.

E-mail: sokolov@op.edu.ua, ph.: +38 098 955 60 41

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0698-7160>



Суворов Владислав Олегович, доктор філософії, старший викладач кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту, Національний університет «Одеська політехніка»; проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна

E-mail: suvorov@op.edu.ua, тел. +38 063 593 94 91

Vladyslav Suvorov, PhD, senior lecture of Department of Electricity and Energy Management, Odessa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Avenue, Odessa, 65044, Ukraine

E-mail: suvorov@op.edu.ua, тел. +38 063 593 94 91

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2842-887X>

Аналіз проблем функціонування системи енергомоніторингу комунального сектору

В. О. Разінков

Національний університет «Одеська політехніка»

Анотація. У статті здійснено аналіз функціонування системи енергомоніторингу в комунальних установах, зокрема в Одеській області, з акцентом на основні проблеми, що виникають під час її впровадження та експлуатації. Досліджено технічні, організаційні та кадрові аспекти, які впливають на ефективність системи, зокрема, питання реєстрації об'єктів, визначення відповідальних осіб та недостатнє навчання персоналу. Особливу увагу приділено обмеженням, що виникають через низьку кількість точок обліку енергоресурсів та відсутність комплексного підходу до аналізу споживання на рівні цілісних установ. На основі виявлених проблем розроблено рекомендації щодо покращення якості функціонування системи енергомоніторингу, зокрема, оптимізація процесу збору даних, підвищення кваліфікації відповідальних осіб та удосконалення технічної інфраструктури. Запропоновані зміни спрямовані на підвищення ефективності управління енергоспоживанням та зниження витрат на енергоресурси в межах комунальних установ, що має позитивний вплив на економіку та сталий розвиток громад.

Ключові слова: енергомоніторинг, енергоспоживання, комунальні установи, енергоменеджмент, енергозбереження, система енергомоніторингу..

Вступ

У сучасних умовах зростаючого попиту на енергоресурси та необхідності зниження негативного впливу на навколишнє середовище, ефективне управління енергоспоживанням стає одним з ключових аспектів сталого розвитку громад. Одним із інструментів, що дозволяє забезпечити контроль за енергоресурсами та оптимізувати їх використання, є система енергомоніторингу. Вона дозволяє не тільки здійснювати точний облік енергоспоживання, але й виявляти нераціональні витрати, своєчасно реагувати на відхилення та приймати ефективні рішення для зниження енергетичних витрат.

Застосування таких систем на рівні комунальних установ є особливо важливим, оскільки ці об'єкти часто стикаються з високими витратами на енергію та необхідністю оптимізувати використання ресурсів для досягнення економії бюджетних коштів. Однак, як показує практика, існуючі системи енергомоніторингу мають низьку надійність, що стосується як організаційних, так і технічних аспектів їх впровадження. Особливі проблеми є неправильна реєстрація об'єктів у системі, визначення відповідальних осіб без належної кваліфікації, а також недостатнє навчання персоналу.

© Разінков В. О., 2025

У даній статті розглядаються ключові проблеми, які виникають у процесі функціонування системи енергомоніторингу в комунальних установах, зокрема в Одеській області, а також пропонуються можливі шляхи їх вирішення. Пропоновані рекомендації мають на меті покращення ефективності використання енергоресурсів, підвищення точності даних, що збираються, і оптимізацію процесу управління енергоспоживанням на рівні громад.

1. Мета дослідження

Метою даної роботи є аналіз функціонування системи енергомоніторингу в комунальних установах, виявлення основних проблем, що виникають під час її застосування, та розробка рекомендацій щодо покращення ефективності та точності збору, обробки та використання даних про енергоспоживання. Зокрема, робота спрямована на удосконалення організаційних процесів, підвищення кваліфікації відповідальних осіб, а також оптимізацію технічних аспектів функціонування системи енергомоніторингу для забезпечення сталого розвитку та економії енергоресурсів на рівні місцевих громад.

2. Матеріали та результати дослідження

Сучасна практика енергоменеджменту на муніципальному рівні передбачає впровадження

систем енергомоніторингу як одного з найефективніших інструментів контролю, аналізу та оптимізації споживання енергоресурсів. У громадських будівлях, зокрема у школах, лікарнях, культурних і адміністративних установах, це дозволяє значно підвищити енергоефективність, скоротити витрати бюджетних коштів і створити передумови для сталого розвитку територіальних громад.

Досвід показує, що впровадження систем енергомоніторингу забезпечує економію енергоресурсів до 10% без додаткових капіталовкладень. В Україні середній показник економії за перший рік становить приблизно 5,5% витрат на енергоспоживання в бюджетному секторі. Такий результат досягається завдяки постійному збору достовірних даних, своєчасному виявленню нераціонального споживання та прийняттю обґрунтованих управлінських рішень. У багатьох випадках це також сприяє формуванню культури ощадного ставлення до енергоресурсів серед персоналу та мешканців громади.

Системи автоматизованого енергомоніторингу мають низку універсальних переваг. Вони підвищують швидкість і точність прийняття управлінських рішень, забезпечують прозорість і достовірність даних, сприяють якісному плануванню енергоспоживання та дозволяють прогнозувати майбутні витрати. Накопичена аналітична інформація дає змогу громадам вибудовувати ефективні енергетичні стратегії та підвищувати рівень своєї інституційної спроможності. Також автоматизація зменшує ризики, пов'язані з людським фактором, і дозволяє зосередитися на впровадженні заходів із покращення енергоефективності замість механічного збору даних.

Сьогодні український ринок пропонує різноманітні автоматизовані інформаційні системи. Наприклад, система АІС «ІСЕ», яка використовується в Одеській області, характеризується високим рівнем комунікації, наявністю якісної технічної підтримки, зручним інтерфейсом, хоча має певні обмеження у функціоналі, зокрема у форматі звітів та можливості перегляду щоденних даних. Інша система — АСЕМ — забезпечує моніторинг у реальному часі, дає змогу виявляти втрати енергоресурсів, швидко реагувати на аварійні ситуації, підключатися до лічильників теплової енергії, електроенергії, газу та води, що значно підвищує ефективність енергоменеджменту.

У рамках досліджень, що спиралися на міжнародний стандарт ISO/IEC 9126-1:2013, було проаналізовано різні системи за такими критеріями, як зручність використання, підтримка користувачів, функціональність, надійність, можливість модифікації, супровід та вартість послуг. Результати демонструють, що найуспішніші платформи підтримують мобільні пристрої, мають логічну структуру обліку, забезпечують захист від помилок і здатні інтегруватися з наявною інфраструктурою громади.

Попит на автоматизований енергомоніторинг зростає, особливо серед малих та середніх громад, які часто стикаються з обмеженістю фінансових ресурсів. Саме тому важливим є супровід з боку міжнародних партнерів і донорських організацій. Наприклад, Програма розвитку ООН реалізує проект, який супроводжує громади в процесі впровадження енергомоніторингу громадських будівель, надає консультації та методичну підтримку. Окрім фінансової вигоди, впровадження енергомоніторингу позитивно впливає на екологічну ситуацію, знижуючи викиди вуглекислого газу та сприяючи виконанню кліматичних зобов'язань громади.

Системний моніторинг споживання енергоресурсів формує новий рівень прозорості та відповідальності, дозволяє громаді позиціонувати себе як сучасну, екологічно свідому адміністративну одиницю, а також є важливим критерієм у загальнонаціональних рейтингах сталого розвитку. З огляду на це, створення національної платформи енергомоніторингу на основі відкритих даних є логічним наступним кроком у побудові ефективної енергетичної політики в Україні.

Аналіз інформаційної системи енергомоніторингу, що функціонує в Одеській області, виявляє суттєву проблему в організації даної системи, яка полягає в неправильному підході до структурування об'єктів споживання енергоресурсів. Зокрема, в системі енергомоніторингу комунальні заклади, відповідно до технічних паспортів, часто мають в своєму складі численні споруди з різним функціональним призначенням, такі як котельні, водонапірні вежі, адміністративні будівлі тощо. Однак при реєстрації таких об'єктів у систему кожна споруда розглядається як окремий об'єкт споживання енергії.

Така практика є недостатньо ефективною з точки зору комплексного аналізу енергоспоживання, оскільки не враховується загальна інтегрованість установи як єдиного

об'єкта. Наприклад, аналіз даних (рис.1) з автоматизованої системи енергомоніторингу показує, що котельня та два корпуси школи, що належать одній і тій же комунальній установі, споживають однакову кількість природного газу на одиницю площі, що є некоректним результатом. Враховуючи, що корпуси школи не газифіковані, така ситуація свідчить про

технічну помилку, зумовлену некоректним введенням даних.

Цей підхід до реєстрації споруд однієї комунальної установи з різним функціональним призначенням у системі енергомоніторингу є некоректним не лише через відсутність комплексного аналізу, але й через обмежену кількість точок обліку споживання енергоресурсів. У найбільш поширених

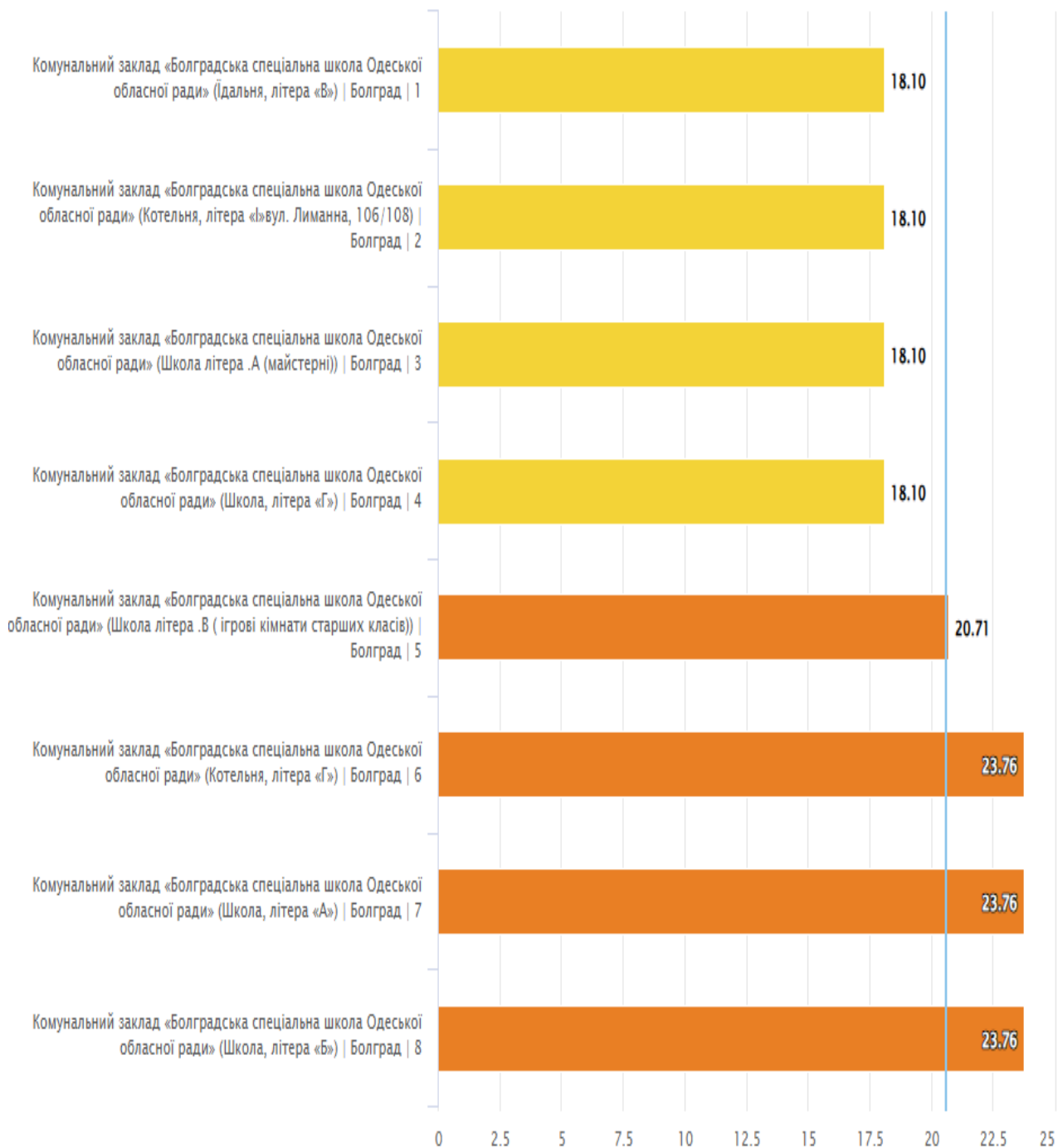


Рис. 1. Рейтинг енергоефективності будівель за завершених місяці поточного року з АІС «ІСЕ» Одеської області

випадках, коли об'єкти та споруди комунальної установи розташовані за однією юридичною адресою, інженерні комунікації та системи, як правило, з'єднані з одним вузлом обліку енергоресурсів. Це означає, що усі енергоресурси для різних споруд постачаються через єдину точку обліку, що суттєво ускладнює процес виділення споживання енергоресурсів по кожному окремому об'єкту.

У таких умовах, комунальна установа зазвичай має лише один розрахунковий рахунок для всіх своїх об'єктів, що ще більше ускладнює точну ідентифікацію енергоспоживання по кожному з них. Таким чином, на практиці важко здійснити коректний розподіл споживання енергії серед різних структурних одиниць, що підпорядковуються єдиному юридичному об'єкту. Це веде до неможливості здійснення точного аналізу та планування енергозбереження для окремих споруд, оскільки реєстрація споживання енергоресурсів через єдину точку обліку не дає можливості здійснити диференційовану оцінку та контроль за ефективністю використання енергії в кожному конкретному об'єкті.

Невідповідність даних є наслідком ручного введення інформації для кожної окремої споруди, що спричиняє неправильну фіксацію енергоспоживання для об'єктів, які реально не використовують певні ресурси. Цей підхід, у свою чергу, не дозволяє отримати об'єктивне уявлення про енергетичні потреби кожної комунальної установи і не забезпечує коректний аналіз для подальших прогнозувань або ухвалення обґрунтованих рішень у сфері енергозбереження.

Однією з ключових проблем у функціонуванні системи енергомоніторингу є питання визначення відповідальних осіб, що безпосередньо впливає на якість і точність введення даних. У загальних даних про устанovu, як правило, зазначаються особи, що відповідають за внесення інформації в систему енергомоніторингу. У випадку великих комунальних установ зазвичай призначається відповідальна особа за господарство, яка часто стає основною для реєстрації та контролю за енергоспоживанням. В інших випадках, особами, які несуть відповідальність за введення даних, можуть бути інженери, енергетики, електрики або спеціалісти з відповідних технічних служб.

Однак для невеликих комунальних установ проблема визначення відповідальних осіб стає більш гострою. Через обмежений штат персоналу нерідко призначають відповідальними особами осіб, які не мають безпосереднього

відношення до управління енергоресурсами, таких як водії чи різноробочі, що значно ускладнює ефективне введення та контроль за даними в інформаційній системі. У таких випадках важко забезпечити належну обізнаність і компетентність осіб, що займаються внесенням даних, у питаннях правильності та актуальності формування звітів про споживання енергоресурсів.

Додатково, проблема загальної поінформованості співробітників щодо важливості та правильності введення даних у систему енергомоніторингу також залишається не вирішеною. На сьогоднішній день для таких осіб майже не проводяться регулярні навчання щодо функціонування та ефективного використання системи. Це веде до того, що деякі співробітники, через незнання або недостатню підготовку, можуть ігнорувати заповнення даних у системі або робити це неправильно. Крім того, зростання обсягу посадових обов'язків, особливо в умовах обмеженого кадрового ресурсу, часто призводить до того, що заповнення автоматизованих систем енергомоніторингу відходить на другий план. В результаті, основні функції, які покладаються на цих осіб, залишаються виконаними належним чином, а вимоги до енергомоніторингу часто не виконуються на достатньому рівні.

Для покращення якості функціонування системи енергомоніторингу в комунальних установах, з урахуванням наведених проблем, можна запропонувати такі рекомендації:

1. Покращення структури реєстрації об'єктів та споруд у системі енергомоніторингу. Слід переглянути підхід до реєстрації об'єктів в системі енергомоніторингу, де кожна споруда з різним функціональним призначенням обліковується окремо. Рекомендується розглядати кожну комунальну устанovu як єдиний об'єкт, що дозволить краще оцінювати загальне споживання енергоресурсів і уникнути перекручувань даних. Варто запровадити комплексний підхід до обліку споживання енергоресурсів з урахуванням взаємозв'язку між спорудами та їхніми комунікаціями.

2. Розширення кількості точок обліку та інтеграція з інженерними системами. Враховуючи обмеженість кількості точок обліку, слід передбачити більш детальну інтеграцію системи енергомоніторингу з інженерними мережами об'єктів. Рекомендується запровадити більш точне і детальне визначення споживання енергоресурсів для кожного підсистеми в межах одного об'єкта, забезпечивши необхідну кількість точок обліку для кожної окремої

функціональної одиниці, такої як котельня, водонапірні вежі, освітлення тощо.

3. Чітко визначення відповідальних осіб. Важливо чітко визначити відповідальних осіб за внесення даних у систему енергомоніторингу, особливо в умовах обмеженого кадрового ресурсу. Замість призначення осіб без необхідної кваліфікації (наприклад, водіїв або різноробочих), слід залучати спеціалістів з відповідною освітою та досвідом, таких як енергетики чи інженери. Для цього варто розробити чітку кадрову політику та процедури призначення відповідальних осіб, що дозволить забезпечити належний рівень компетентності та відповідальності за правильне введення і обробку даних.

4. Регулярне навчання та підвищення кваліфікації персоналу. Для забезпечення ефективного використання системи енергомоніторингу необхідно організувати регулярні тренінги та навчання для усіх відповідальних осіб. Це включає не тільки теоретичну підготовку, а й практичні заняття з використання системи, розуміння важливості правильного формування звітів та моніторингу енергоспоживання. Оновлення знань повинно проводитися на регулярній основі для забезпечення високої якості даних.

5. Впровадження автоматичних процедур та зменшення людського фактору. Слід забезпечити автоматизацію більшості процесів, що дозволить мінімізувати вплив людського фактора на точність внесених даних. Включення більш розвинених алгоритмів для автоматичного збирання та обробки даних, а також для створення звітів, допоможе зменшити кількість помилок та підвищити ефективність функціонування системи.

6. Вдосконалення інтеграції з іншими системами управління енергоспоживанням. Важливо забезпечити належну інтеграцію системи енергомоніторингу з іншими інструментами управління енергоспоживанням, такими як системи енергозбереження або автоматизовані системи управління будівлею. Це дозволить створити єдину платформу для комплексного управління енергетичними ресурсами на рівні громади.

7. Покращення взаємодії з іншими органами влади та організаціями. Оскільки питання енергомоніторингу є важливим на рівні громади, важливо забезпечити взаємодію з іншими державними органами та організаціями для обміну досвідом, запровадження найкращих практик та отримання необхідної підтримки. Взаємодія з екологічними та енергетичними

агентствами дозволить покращити стратегічне управління енергоресурсами на всіх рівнях.

8. Постійний моніторинг ефективності системи. Для того, щоб система енергомоніторингу залишалася актуальною і ефективною, необхідно постійно моніторити її роботу, виявляти та виправляти недоліки. Рекомендується встановлення регулярних перевірок та аудитів, що дозволить своєчасно виявляти проблеми та оперативно реагувати на зміни в умовах енергоспоживання.

Загалом, для покращення функціонування системи енергомоніторингу необхідно комплексно підходити до її модернізації, включаючи кадрові зміни, автоматизацію процесів, забезпечення навчання персоналу та інтеграцію з іншими системами управління. Це дозволить не лише підвищити ефективність використання енергоресурсів, а й забезпечить сталий розвиток і економічну вигоду для громади.

Список використаної літератури

1. ДСТУ ISO 50001:2020 (ISO 50001:2018, IDT) Системи енергетичного менеджменту [Чинний від 2020-03-06] – Київ: ДП УкрНДНЦ, 2020. 33с.
2. Експертний огляд програмного забезпечення для енергомоніторингу та енергоменеджменту [Електронний ресурс] // Асоціація «Енергоефективні міста України». – 2018. https://enecities.org.ua/upload/files/Publications/Analytics/Expert_review_SW_2018.pdf
3. Праховника А. В. Управління енерговикористанням [Текст] – Альянс за збереження енергії – 2001 568 с.
4. Коцар О.В. Дорожня карта розвитку АСКОЕ в Україні в рамках [Текст] – Енерг. та електрифікація, 2019. – № 2 с. 16 – 30.

References

1. DSTU ISO 50001:2020 (ISO 50001:2018, IDT) Energy Management Systems [Valid from 2020-03-06] – Kyiv: DP UkrNDNTS, 2020. 33p.
2. Expert review of software for energy monitoring and energy management [Electronic resource] // Association "Energy Efficient Cities of Ukraine". – 2018. https://enecities.org.ua/upload/files/Publications/Analytics/Expert_review_SW_2018.pdf
3. Prakhovnyka A. V. Energy Use Management [Text] – Alliance for Energy Conservation – 2001 568 p.

4. Kotsar O. V. Roadmap for the development [Text] – Energy. and electrification, 2019. – No. 2 of ASKOE in Ukraine within the framework of pp. 16 – 30.

Analysis of Problems in the Operation of the Energy Monitoring System in the Municipal Sector

V. Razinkov

Odesa Polytechnic National University

Abstract. The article provides a comprehensive analysis of the functioning of the energy monitoring system in municipal institutions using the example of the Odessa region, in particular, it examines key problems that arise during its implementation and operation. In particular, it focuses on technical, organizational and personnel aspects that affect the accuracy and efficiency of collecting and processing data on energy consumption. One of the main problems is the breakdown of municipal institutions into separate structural units, which complicates the implementation of a comprehensive analysis of energy consumption. The issue of a limited number of energy resource accounting points is also considered, which does not allow for an accurate division of energy consumption into different parts of one institution. The problem of determining the persons responsible for entering data into the system is separately raised, in particular, due to the insufficient level of staff awareness and the lack of regular training.

It was determined that one of the reasons for the imperfection of the system is also the ineffective organization of the monitoring process and the lack of a unified approach to collecting energy consumption data at the level of all facilities of the institution. Many municipal institutions in Ukraine, especially those with limited resources, face the problem of insufficient staffing, which leads to the transfer of responsibility for maintaining the energy monitoring system to non-core employees.

The article develops recommendations for improving the functioning of energy monitoring systems, including: improving the process of registering objects in the system, integrating a larger number of metering points, improving the skills of responsible persons through regular training, and ensuring better coordination between different departments of the institution. It is proposed to improve the technical infrastructure to ensure more accurate data collection, which will allow for real monitoring of energy consumption at the level of the entire institution, rather than its individual parts. Special attention is also paid to the need to integrate the energy monitoring system into the overall energy management strategy of the community, which will contribute to reducing energy costs and increasing energy efficiency.

The study is important for improving energy efficiency at the level of local communities, contributing to the optimization of energy saving processes, reducing energy consumption costs and ensuring sustainable development. The implementation of the proposed recommendations will not only reduce energy resource costs, but also improve the environmental situation, contributing to the creation of a positive image of the community as progressive and environmentally responsible.

Keywords: energy monitoring, energy supply, utility installations, energy management, energy saving, energy monitoring system.

Отримано 05.05.2025



Разінков Владислав Олексійович, старший викладач кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту, Національний університет «Одеська політехніка»; проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна.
E-mail: razinkov.v.o@opu.ua; тел.: +38 048 705 8512

Razinkov Vladyslav Oleksiiovych, senior teacher of the Department of power supply and energy management, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Avenue, Odesa, 65044, Ukraine. E-mail razinkov.v.o@opu.ua; ph.: +38 048 705 8512

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0934-0426>

A Phase Correction Node Construction for Cyber-Physical Systems Based on All-pass Filters

T. Sytnikov V. Sytnikov
Odessa National Polytechnic University

Abstract The article examines a cyber-physical system using the example of an autonomous mobile platform (AMP), which contains hardware and software components. However, AMPs have limitations regarding power consumption, computational capacity, and real-time operation independently. The uncertainty of the environment necessitates the use of means that correct sensor signals. To correct the phase of AMP sensor signals, all-pass filters are used. The paper discusses the construction of all-pass filters based on low-order LPF and HPF, as well as BPF and BRF. Phase correction improvement is achieved by increasing the order of the transfer function through the sequential connection of such filters. Schemes of correction nodes implementation are presented.

Keywords: cyber-physical system, autonomous mobile platform, all-pass filter, LPF and HPF, BPF and BSF, frequency characteristics, phase correction formation

Introduction

The modern development of society is characterized by the rapid growth of cyber-physical systems. At present, there are many definitions of cyber-physical systems [1–7]. In general, cyber-physical systems (CPS) are systems consisting of various natural objects, artificial subsystems, and controllers that manage them, which makes it possible to consider such a formation as a single whole. The interaction between computational and physical resources of the system enables active monitoring and control of physical processes based on feedback. The main technical prerequisites for the emergence of cyber-physical systems are [1–7]:

- the increase in the number of devices with embedded microprocessors and processors, as well as data storage facilities;
- integration, which allows achieving the greatest effect by combining individual components into large systems;
- the presence of a large number of sensors and actuators;
- imitations of human cognitive abilities, which evolve more slowly than machines, and inevitably comes a point when they cannot cope with the amount of information required for decision-making and event response.

Typically, this is an embedded system as a special-purpose system, in which the computational element is fully embedded in the device it controls.

© T. Sytnikov, V. Sytnikov, 2025

Unlike a general-purpose computer, an embedded system performs one or several predefined tasks, usually with very specific real-time requirements. Technically, an embedded system interacts with the environment in a controlled manner, meeting a number of requirements for ensuring the quality and timeliness of information necessary for control and task execution.

Cyber-physical systems integrate cybernetics, computer hardware and software technologies, qualitatively new actuators embedded in the environment and capable of perceiving its changes, responding to them, self-learning, and adapting. It should be noted that the general architecture of CPS is divided into four fundamental levels [1–3]:

- physical level (the physical level forms the foundation of the CPS architecture);
- network level (packet routing based on the transformation of the unique identifier assigned to each active equipment in the network);
- transport level (packets are divided into small fragments);
- intermediate level (terminal management, protocol conversion);
- application level (stores, analyzes, and updates information).

Autonomous mobile platforms (AMP) can also be attributed to such systems, as their structural organization corresponds to cyber-physical systems. Since the integration of physical processes and cybernetic components makes it possible to enhance the intellectual capabilities of such platforms when

performing their functions [8]. In such systems, preliminary motion modeling is often used to ensure safety within an AMP group when performing a task [9, 10]. Reliable data on the state of the AMP and the environment are required for this.

Hardware and software components must be mobile, flexible, adaptive, and able to adjust to operating conditions with limited power sources, dimensions, and weight. This is possible when using multi-functional sensors, hardware, and software components of computing systems that must operate in real time.

However, such systems also have a number of requirements and limitations. Usually, AMPs are limited in size, power supply, and computational capacity. This leads to the need to develop hardware and software components with minimal power consumption while ensuring task execution, and data processing is also limited in algorithm implementation. This fits well into modern concepts of Industry 4.0–6.0 development [11–15].

The object of the study is the process of processing and correcting AMP sensor signals within a cyber-physical system without operator involvement. With a large number of sensors and in the presence of interference, filtering and correction are required with the ability to reconfigure processing component parameters in real time. Such adaptation to operating conditions increases the reliability of decision-making data and the execution of tasks by actuators.

The subject of the study is the construction of a node for correcting the phase of AMP sensor signals onboard, with the ability to reconfigure parameters and configuration to ensure operational work.

Sensor signal correction must compensate for amplitude and phase distortions in sensor signals [16]. Such a task can be assigned to amplitude and phase correctors.

Therefore, the aim of the study is the need to use convenient and simple approaches to create digital devices that make it possible to compensate for phase distortions for AMP based on all-pass filters.

1. All-pass filter

Phase correctors, or all-pass filters, pass all signal frequencies with equal gain, but they change the signal phase [17]. Thus, these filters are used for phase correction in sensor signal processing to compensate for phase distortions.

It is known that such filters have a transfer function denominator described by the Hurwitz polynomial $Q(p)$, and its numerator by the related polynomial. If P_k - is a root of the denominator, then $(-P_k)$ - is a zero of the numerator.

$$K(p) = \frac{Q(-p)}{Q(p)}$$

For digital all-pass filters, the corresponding analogue of the Hurwitz polynomial is used. In this case, in a first-order digital all-pass filter, the zero and pole lie on the real axis of the Z -plane, so that the pole module has a value $r < 1$, and the zero module equals $-1/r$. As a result, the zero compensates for the effect of the pole. This circumstance leads to the fact that the amplitude-frequency characteristic (AFC) equals one over the entire frequency range.

2. First-order filter

Based on this description of a first-order digital all-pass filter, its transfer function will have the following form

$$H_F(z) = \frac{b_1 + z^{-1}}{1 + b_1 z^{-1}}, \quad (1)$$

where b_1 - is the transfer function coefficient.

Let us find the phase-frequency characteristic of such an all-pass filter

$$\varphi = -\arctg \frac{(1 - b_1^2) \sin(\bar{\omega})}{2b_1 + (1 + b_1^2) \cos(\bar{\omega})}$$

Thus, in general, such a filter does not change the signal amplitude but corrects its phase. However, there is one peculiarity: the closer the coefficient b_1 to one, the stronger the phase correction.

The creation of all-pass filters is not a simple task [17–19]. Therefore, simpler methods are needed for their construction.

In this work, low-order digital low-pass and high-pass filters are used for this purpose. The transfer functions of first-order normalized low-pass filters $H_L(z)$ and normalized high-pass filter $H_H(z)$ have the following form

$$H_L(z) = \frac{a_L + a_L z^{-1}}{1 + b_1 z^{-1}}, \quad H_H(z) = \frac{a_H - a_H z^{-1}}{1 + b_1 z^{-1}}. \quad (2)$$

In this case, the transfer function of the all-pass filter can be obtained by transforming the denominator of these filters to form the numerator in such a way that it has the following form $b_1 + z^{-1}$. Then, the transfer function of the all-pass filter $H_F(z)$ can be obtained as their difference.

$$H_F(z) = H_L(z) - H_H(z) \tag{3}$$

In this case, the required numerator and denominator polynomials are formed, and the phase is determined as follows.

$$\varphi_1(\bar{\omega}) = \arctg \frac{(ab_1 - d) \sin(\bar{\omega})}{(a + db_1) + (ab_1 + d) \cos(\bar{\omega})},$$

where $a=aL-aH, d=aL+aH$.

Increasing phase correction makes it necessary to increase the order of the transfer function, which can be done by sequentially connecting identical low-order all-pass filters. When connected in series, their transfer functions are multiplied, and since they are identical, this is equivalent to raising to the power equal to the number of sequentially connected filters.

$$(H_F(z))_n = \prod_{i=1}^n H_{Fi}(z) = (H_F(z))^n \tag{4}$$

It should be noted that in this case the phase changes according to the relation

$$\varphi_n = n\varphi_1, \tag{5}$$

where φ_1 - is the phase of the first-order all-pass filter.

This solution makes it possible, depending on the system operation, to automatically change the processing path configuration according to the distortion criterion.

For practical implementation, a block diagram of the correction unit has been developed, where the signal enters two channels, Fig. 1.

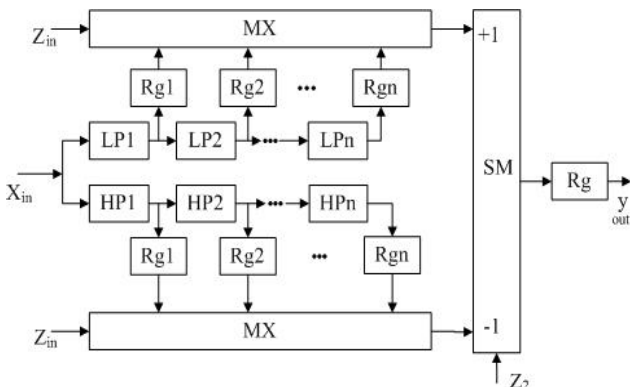


Fig. 1 Structural diagram of the formation of a first-order all-pass filter

In the first channel, n digital LP filters of the first order are connected; in the second, n digital HP filters of the first order. The outputs of each filter of such a connection in each channel go to a multiplexer (MX), which, depending on the functioning of the path and signal distortion, switches the outputs of the required number of elementary filters to an adder (SM), which performs subtraction according to relation (3). Thus, the AFC and PFC of a new connection are formed, which is equivalent to an all-pass filter of the corresponding order. In this case, the coefficient b_1 becomes the control parameter of phase correction [20].

In addition, it is possible to form the transfer function of the all-pass filter by preparing such a function in advance and creating a table of denominator coefficients b_1 . Such a coefficient table will correspond to the level of phase correction, and the increase in the degree of the transfer function, to enhance phase correction, can also be formed through the table when such an influence is studied in advance.

3. Second-order filter

The transfer function of a second-order all-pass filter, based on theory and by analogy with the first-order filter, has the following form

$$H_{F2}(z) = \frac{b_2 + b_1 z^{-1} + z^{-2}}{1 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}} \tag{6}$$

Based on this description of a first-order digital all-pass filter, let us find the phase-frequency characteristic of the phase filter

$$\varphi = -\arctg \frac{(1 - b_2) \sin(\bar{\omega})}{b_1 + (1 + b_1) \cos(\bar{\omega})},$$

where b_1, b_2 - are the transfer function coefficients.

To form a second-order all-pass filter, one can use a band-pass digital filter and a band stop digital filter. The transfer functions of the first order (although their transfer functions are described by second-order equations) of the band stop digital filter $H_R(z)$ and the band-pass digital filter $H_B(z)$ have the following form

$$H_R(z) = \frac{a_{R0} + a_{R1}z^{-1} + a_{R2}z^{-2}}{1 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2}},$$

$$H_B(z) = \frac{a_{B0} + a_{B1}z^{-1} + a_{B2}z^{-2}}{1 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2}} \quad (7)$$

In this case, the transfer function of the all-pass filter can be obtained by transforming the denominator of these filters to form the numerator so that it has the form as in (6).

Then, the transfer function of the all-pass filter HF2(z) can be obtained as their difference.

$$H_{F2}(z) = H_R(z) - H_B(z) \quad (8)$$

Increasing phase correction makes it necessary to increase the order of the transfer function, which can be done by multiplying identical all-pass filters, as in the case of first-order filters in relations (4) and (5).

For practical implementation, a structural diagram of the correction unit is proposed, where the signal enters two channels, Fig. 2.

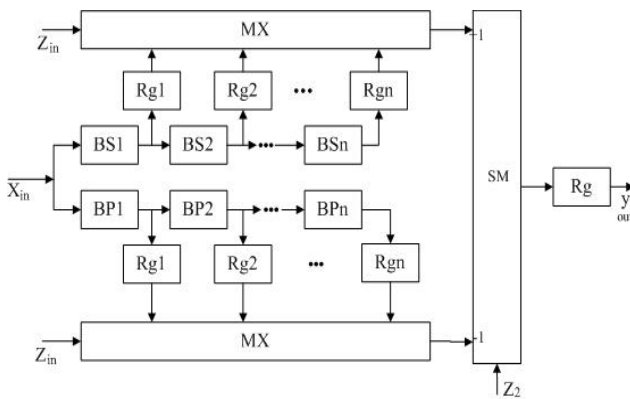


Fig. 2 Structural diagram of the formation of a second-order all-pass filter

In the first channel, n band stop filter (BS) are connected; in the second, n digital band-pass filters (BP). The outputs of each filter of such a connection in each channel go to a multiplexer (MX), which, depending on the functioning of the path and signal distortion, switches the outputs of the required number of elementary filters to an adder (SM), which performs subtraction according to relation (8). Thus, the AFC and PFC of a new connection are formed, which is equivalent to an all-pass filter of the corresponding order.

When forming the phase correction unit of sensor signals, it should be taken into account that the AMP has limited energy resources onboard. Therefore, the solution shown in Fig. 1 and Fig. 2 is not very successful from the point of view of power consumption, since 2n filters will be connected sim-

ultaneously, but on the other hand, in such an implementation, the transient process during switching is reduced, since the filters are already connected, and the multiplexer only switches the necessary signals to form correction. In this case, this contradiction must be resolved in a specific task, and the correction channel must be formed. It should also be noted that all filters are identical and need to be re-configured only once, not each individually.

However, such a solution can be implemented on an FPGA, which will be pre-programmed and embedded into the processing path, allowing, depending on platform functioning, automatic re-configuration of the correction channel according to the distortion criterion.

4. Software implementation

To build a software implementation of the all-pass filter formation, used a directed and ordered graph of the first-order transfer function (1), Fig. 3.

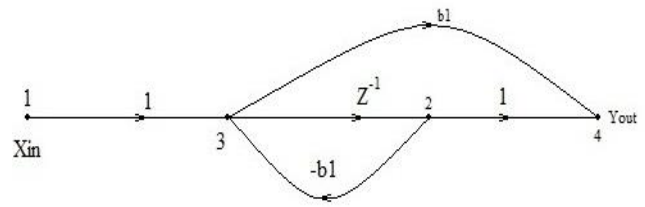


Fig. 3 Directed graph of the first-order all-pass filter

Based on this graph, a system of state equations of the graph nodes can be formed.

$$\begin{cases} x_1[i] = x_{in}[i] \\ x_2[i] = x_3[i-1] \\ x_3[i] = x_1[i] - b_1 x_2[i] \\ x_4[i] = x_2[i] + b_1 x_1[i] \\ y_{out}[i] = x_4[i] \end{cases}$$

Based on this system of equations, form a program for generating the output signal yout from the input xin, which implements the transfer function (1).

Based on the implementation of this system of equations, it is possible to form their sequential connection programmatically using recursion. A fragment of a C\C++ program looks as follows.

```
struct Parameters {
    double x3 = 0;
    double y_out = 0;
} param;
```

```

void firstOrder(const double b1, int deep, const
double value)
{
    const double x3 = value - b1 * param.x3;
    param.y_out = param.x3 + b1 * value;
    param.x3 = x3;

    if(deep-1 == 0)
        return;

    firstOrder(b1, deep-1, param.y_out);
}

```

For the second-order filter, such a graph has the following configuration, Fig. 4.

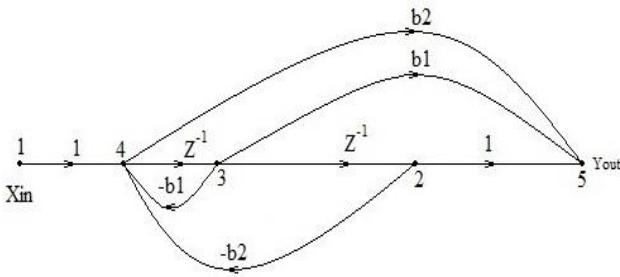


Fig. 4 Directed graph of the second-order all-pass filter

Then the system of state equations of the graph nodes will have the following form.

$$\begin{cases}
 x_1[i] = x_{in}[i] \\
 x_2[i] = x_3[i-1] \\
 x_3[i] = x_4[i-1] \\
 x_4[i] = x_1[i] - b_1 x_3[i] - b_2 x_2[i] \\
 x_5[i] = b_2 x_2[i] + b_1 x_3[i] + x_4[i] \\
 y_{out}[i] = x_5[i]
 \end{cases}$$

Based on this system of equations, we form a program for generating the output signal y_{out} from the input x_{in} , which implements the transfer function (6).

Based on the implementation of this system of equations, it is possible to form their sequential connection programmatically using recursion. A fragment of a C\C++ program looks as follows.

```

struct Parameters {
    double x3 = 0;
    double x4 = 0;
    double y_out = 0;
} param;

```

```

void secondOrder(const double b1, const double
b2, int deep, const double value)
{
    const double x4 = value - b1 * param.x4 - b2
* param.x3;
    param.y_out = b2 * param.x3 + b1 *
param.x4 + x4;
    param.x3 = param.x4;
    param.x4 = x4;

    if(deep-1 == 0)
        return;

    secondOrder(b1, b2, deep-1, param.y_out);
}

```

The software sketch simplify the implementation of the sensor signal phase correction unit.

Conclusions

The work shows that the use of digital filters makes it convenient to build an all-pass filter, and its use makes it possible to form a phase correction unit for AMP. In the authors' opinion, the software implementation of such a filter is convenient and more flexible for use and reconfiguration. The use of such a unit will automatically evaluate and change its characteristics when phase distortion occurs, in order to improve the correction of sensor signal phases and the efficiency of the system as a whole.

References

1. Melnyk A.O., Melnyk V.A., Glukhov V.S., Salo A.M. Cyber-physical systems: multi-level organization and design. Lviv: "Magnolia 2006", 2024. – 238 p. ISBN 978-617-574-138-2
2. Bochkarev O.Yu., Golemba V.A., Paramud Ya.S., Yatsuk V.O. Cyber-physical systems: data collection technologies. Lviv: "Magnolia 2006", 2024. – 176 pp. ISBN 978-617-574-139-9
3. Gritsenko V.I., Bazhan L.I., Ershova O.L. Cyber-physical system — a distributed system of intelligent control. Control systems and machines. 2019. No. 2. 3–15 p. DOI: <https://doi.org/10.15407/usim.2019.02.003>
4. Aulin V.V., Hrynkiv A.V., Holovaty A.O. Cyber-physical approach to the creation, functioning and improvement of transport and production systems. Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Notes, 2020. Issue 3(34) [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2020.3\(34\).331-343](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2020.3(34).331-343)
5. Aulin V.V., Hrynkiv A.V., Lysenko S.V., Livytsky O.M., Holovaty A.O., Dyachenko V.O.

Principles of construction and functioning of a cyber-physical system of technical service of motor vehicles and mobile agricultural machinery. Technical service of agro-industrial, forestry and transport complexes No. 22, 2020. <https://doi.org/10.37700/ts.2020.22.162-174>

6. Halder S., Afsari K., Akanmu A. A Robotic Cyber-Physical System for Automated Reality Capture and Visualization in Construction Progress. Virginia Tech 10 Feb 2024 Vol. abs/2402.07034 10.48550/arxiv.2402.07034

7. Mañas-Álvarez F.J.; Guinaldo, M., Dormido, R., Dormido-Canto, S. Scalability of Cyber-Physical Systems with Real and Virtual Robots in ROS 2. Sensors, 2023, 23, 6073. <https://doi.org/10.3390/s23136073>

8. Voloshyn, D., Brechko, V., Semenov, S. Method of an unmanned aerial vehicle composition route in space. Advanced Information Systems, 2021 5(4), 26–33 pp. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.4.04>

9. Semenov S., Jian Y., Jiang H., Chernykh O., Binkovska A. Mathematical model of intelligent uav flight path planning. Advanced Information Systems, Vol. 9 No. 1 2025, 49-61 pp <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2025.1.06>

10. Zolotukhina O. A., Voloshin D. G., Davydov V. V., Brechko V. O. Development of a simulation model of the process of calculating and adjusting the safe flight trajectory of an unmanned aerial vehicle. Telecommunications and Information Technologies. 2020. No. 4 (69). 87–94 pp. DOI:10.31673/2412-4338.2020.048794

11. Paiva Santos B., Charrua-Santos F., Lima T.M.. Industry 4.0: An Overview, pp 1-7 https://www.researchgate.net/publication/326352993_Industry_40_an_overview

12. Nwasuka N.C., Nwadinobi U.N., Princewill C. INDUSTRY 4.0: AN OVERVIEW Proceedings on Engineering Sciences, Vol. 04, No. 1 2022, 69-78pp, DOI:10.24874/PES04.01.010

13. B. Babu, J. D. Nallasivam, S. Aravinth J. Overview of industry 4.0. International conference on science, technology and management, July 2023, 14-16 pp, https://www.researchgate.net/publication/372371011_OVERVIEW_OF_INDUSTRY_40

14. Adel A. Future of industry 5.0 in society: human-centric solutions, challenges and prospective

research areas. Journal of Cloud Computing: Advances, Systems and Applications. Volume 11, Article number: 40 2022, 1-15 pp. <https://doi.org/10.1186/s13677-022-00314-5>

15. Murugan M., Prabadevi M.N. Impact of Industry 6.0 on MSME Entrepreneur's Performance and Entrepreneur's Emotional Intelligence in the Service Industry in India. Journal Revista de Gestão Social e Ambiental, 2023, v. 17, № 4, 1-15 pp <https://doi.org/10.24857/rgsa.v17n4-007>

16. Sytnikov T. V., Baderko I. V., Bilenko A. O., Sytnikov V. S. Analysis of phase-frequency characteristics when using filters of the same type to increase the order of processing sensor signals. Proceedings of the MNPK "Modern information and electronic technologies", Ukraine, Odesa, 2024, 36–37p.

17. Mitra S. Digital signal processing. McGraw-Hill, 2001, 866 p. <https://www.amazon.com/Digital-Signal-Processing-Computer-Based-Laboratory/dp/0072513780>

18. Krstic I. Design of allpass-based IIR multi-notch filters with identical pole radiuses. Serbien Journal of Electrical Engineering, Vol. 20, No. 1, February 2023, 1-11pp. DOI: <https://doi.org/10.2298/SJEE2301001K>

19. Sergienko A.M. Analysis of digital filters using VHDL. Phase and masking filters. Professor Kanevsky Laboratory <https://kanyevsky.kpi.ua/vhdl-%D1%82%D0%B0-%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%83%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F-%D0%BF%D0%BB%D1%96%D1%81%D0%B0%D0%BD%D0%B0%D0%BB%D1%96%D0%B7-%D1%86%D0%B8%D1%84%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D1%85-%D1%84%D1%96%D0%BB%D1%8C%D1%82%D1%80%D1%96%D0%B2-%D0%B7%D0%B0-%D0%B4%D0%BE%D0%BF%D0%BE%D0%BC%D0%BE%D0%B3%D0%BE/>

20. Sytnikov T. V., Baderko I. V., Dilenko O. V., Bilenko A. O., Sytnikov V. S. Using a phase corrector for processing bioelectrical sensor signals. Proceedings of the XXXVI International Scientific and Practical Conference on Modern Information and Electronic Technologies SIET-2025 2025, Odessa - 15-16 from <https://old.tkea.com.ua/siet/inf.html>

Побудова вузла корекції фази для кіберфізичних систем на основі всепропускних фільтрів

Т. В. Ситніков, В. С. Ситніков

Національний університет "Одеська політехніка"

Анотація. У статті розглядається кіберфізична система, на прикладі автономної мобільної платформи (АМП), яка містить в собі апаратно-програмні компоненти. Однак АМП мають обмеження до енергоспоживання, обчислювальної потужності та функціонуванні в реальному часі самостійно. Невизначеність навколишнього середовища обумовлює застосування засобів, що коректують сигнали датчиків. Для корекції фази сигналів датчиків АМП використовують всепропускні фільтри. В роботі розглянуті питання побудови всепропускних фільтрів на основі фільтрів низького порядку ФНЧ та ФВЧ, а також СФ та РФ. Підвищення корекції фази виконується через підвищення порядку передавальної функції шляхом послідовного з'єднання таких фільтрів. Наведені схеми реалізації вузлів корекції.

Ключові слова: кіберфізична система, автономна мобільна платформа, всепропускний фільтр, ФНЧ та ФВЧ, СФ та РФ, частотні характеристики, формування корекції фази

Отримано 15.09.2025



Tykhon Sytnikov, post-graduate student of the Computer Systems Department, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Avenue, Odessa, 65044, Ukraine.

E-mail: tykhon.sytnikov@gmail.com, ph.: +38 048 705 8454

Ситніков Тихон Валерійович, аспірант кафедри комп'ютерних систем, Національний університет «Одеська політехніка»; проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна.

E-mail: tykhon.sytnikov@gmail.com, тел. +38 048 705 8454

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0137-5643>



Sytnikov Valery Stepanovich, Dr. Eng. of Science, Professor, Computer System Department Head, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Avenue, Odessa, 65044, Ukraine. E-mail: sitnikov@op.edu.ua, ph.: +38 067 456 7165

Ситніков Валерій Степанович, д.т.н., професор, завідувач кафедри комп'ютерних систем, Національний університет «Одеська політехніка»; проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна. E-mail: sitnikov@op.edu.ua, тел. +38 067 456 7165

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3229-5096>

Web of Science Researcher ID: 57190377358

Стан та розвиток технологій повторної ідентифікації людини в інтелектуальних відеосистемах

А. С. Колпіков, Е. М. Забарна, М. В. Лобачев
Національний університет «Одеська політехніка»

Анотація. В статті розглянуто сучасний стан і основні напрями розвитку технологій повторної ідентифікації людини (re-ID) в інтелектуальних системах відеоспостереження. Визначено формальну постановку задачі повторної ідентифікації та охарактеризовано її роль у забезпеченні безперервного автоматичного моніторингу об'єктів між неперетинними камерами. Проаналізовано основні виклики, що ускладнюють вирішення цієї задачі в реальних умовах, серед яких – варіативність зовнішнього вигляду, зміни ракурсу та освітлення, часткове перекриття, перенос знань між доменами (domain shift), обмеженість навчальних даних та апаратних ресурсів. В роботі узагальнено підходи до вилучення ознак, зіставлення зображень та методів глибинного навчання, які використовуються для побудови ефективних re-ID моделей. Особливу увагу приділено сучасним тенденціям у використанні генеративних змагальних мереж (GAN) та attention-механізмів (механізмів уваги), що сприяють покращенню точності ідентифікації. Наведено перспективні напрями подальших досліджень, зокрема у сфері мультимодального навчання, адаптації до нових доменів та етичного впровадження технологій у публічні середовища.

Ключові слова: повторна ідентифікація людини, інтелектуальні відеосистеми, комп'ютерний зір, глибоке навчання, ознаковий простір, метричне навчання, генеративні змагальні мережі, attention-механізм (механізм уваги).

Вступ

У контексті зростаючого попиту на системи забезпечення громадської безпеки, автоматизований моніторинг публічних просторів набуває дедалі більшого значення. Інтелектуальні відеосистеми, оснащені засобами комп'ютерного зору та штучного інтелекту, відкривають нові можливості для автоматичного аналізу поведінки об'єктів у реальному часі. Однією з ключових задач, що постає в рамках таких систем, є повторна ідентифікація людини – процес встановлення відповідності між візуальними зображеннями однієї й тієї ж особи, зафіксованими різними камерами або в різні моменти часу [1].

На відміну від класичного розпізнавання обличчя, повторна ідентифікація передбачає ідентифікацію особи в умовах, коли її зовнішній вигляд може змінюватися, а зображення містять лише загальний вигляд постаті, без чітко видимих біометричних рисунків.

Актуальність досліджень у цій сфері зумовлена поширенням систем відеоспостереження у

містах, транспортних вузлах, торгових центрах, аеропортах та інших об'єктах критичної інфраструктури. У таких умовах необхідність автоматизованого та надійного встановлення ідентичності особи між неперетинними камерами стає ключовим чинником ефективності роботи відеоаналітичних систем. Повторна ідентифікація дозволяє не лише відстежувати переміщення людей у просторі, а й сприяє розширенню функціональності систем безпеки, виявленню аномальної поведінки, аналізу потоків відвідувачів та інтеграції з іншими аналітичними модулями [2].

Разом з тим, розв'язання задачі повторної ідентифікації є складним технічним завданням, що супроводжується низкою суттєвих викликів. До основних проблем належать варіативність зовнішнього вигляду людини внаслідок змін одягу, ракурсу, освітлення, якості зображення, а також складність умов зйомки у різних камерах і наявність шумових факторів у фоновому середовищі.

Крім того, ідентифікація вимагає стійкості моделей до часткових оклюзій, різного масштабу зображень та обмеженої кількості прикладів для навчання (рис. 1) [3]. Особливу складність становить перенесення моделей, навчених на одних

© Колпіков А. С., Забарна Е. М.,
Лобачев М. В., 2025

даних, у нові середовища, де умови зйомки значно відрізняються.

У відповідь на ці виклики сучасна наукова спільнота активно розробляє нові алгоритмічні рішення, засновані на методах глибокого навчання, зокрема згорткових нейронних мереж, attention-механізмів, трансформерних архітектур та навчання на подібності ознак (metric learning). Важливу роль відіграє також створення великих відкритих датасетів, що дозволяють дослідникам

розробляти та тестувати моделі в умовах, наближених до реальних.

Метою цієї статті є всебічний аналіз сучасного стану технологій повторної ідентифікації людини в системах відеоспостереження.

У роботі розглядаються ключові підходи до розв'язання задачі re-ID, аналізуються основні труднощі її практичної реалізації, порівнюються найбільш поширені методи та моделі, а також окреслюються перспективні напрями подальших досліджень у цій галузі.



Рис.1. Кілька прикладів зображень з навчального набору даних ReID780. Кожен рядок відповідає різним зображенням для однієї особи. В якості прикладу можна навести рядок зображення мають різну орієнтацію та позу відповідної людини, а також різні умови освітлення та фони [3]

1. Постановка задачі

Задача повторної ідентифікації людини (*person re-identification*, re-ID) полягає у встановленні того, чи належать два або більше зобра-

жень, отриманих з різних камер спостереження або в різні моменти часу, одній і тій самій особі.

В рамках інтелектуальних систем відеоспостереження ця задача є ключовим компонентом, що забезпечує безперервне відстеження об'єктів

між неперетинними камерами без ручної участі оператора.

Нехай задано множину відеокамер $\{C_1, C_2, \dots, C_K\}$, які генерують зображення або відео потоки, в яких виявляються об'єкти (люди). Після етапу детекції з кожного кадру виділяються фрагменти зображень, що містять окремих осіб. Позначимо набір зображень людей як $\mathcal{I} = \{I_1, I_2, \dots, I_N\}$, де кожне зображення I_i містить зону кадру з однією особою.

Кожному зображенню I_i відповідає вектор ознак $f_i \in \mathbb{R}^d$, отриманий за допомогою функції екстракції ознак $f(\cdot)$, яка реалізується, як правило, глибокою нейронною мережею:

$$f_i = f(I_i; \theta), \quad (1)$$

де θ – параметри мережі, що підлягають навчанню.

Мета повторної ідентифікації полягає в тому, щоб для заданого запиту (query image) I_q знайти серед галереї зображень $G = \{I_1, \dots, I_M\}$ всі ті, що відповідають тій же особі, що й I_q . Задача формулюється як задача пошуку найбільш схожих зображень у ознаковому просторі:

$$\hat{I} = \arg \min_{I_j \in G} d(f_q, f_j), \quad (2)$$

де $f_q = f(I_q)$, $f_j = f(I_j)$, а $d(\cdot, \cdot)$ – функція відстані, наприклад, евклідова відстань:

$$d(f_q, f_j) = \|f_q - f_j\|_2, \quad (3)$$

або косинусна відстань:

$$d_{cos}(f_q, f_j) = 1 - \frac{f_q^T f_j}{\|f_q\| \|f_j\|}. \quad (4)$$

Для навчання моделі використовують або підхід класифікації, де кожному класу відповідає окрема особа, або метричне навчання (metric learning), яке націлене на формування такого ознакового простору, в якому зображення однієї й тієї ж особи знаходяться близько одне до одного, а зображення різних осіб – далеко. Один із найпоширеніших підходів – використання функції триплетних втрат:

$$\mathcal{L}_{triplet} = \max(0, d(f_a, f_p) - d(f_a, f_n) + \alpha), \quad (5)$$

де f_a , f_p , f_n – вектори ознак для відповідно анкори (anchor), позитивного прикладу (той самий клас) і негативного прикладу (інший клас), а α –

пороговий параметр (margin), що визначає мінімальну бажану відстань між класами.

В альтернативних підходах також використовується контрастивна втрата, класифікаційна втрата на softmax-шарі, або комбіновані функції втрат, які водночас оптимізують якість розподілу ознак і здатність класифікувати об'єкти.

У загальному випадку, задача повторної ідентифікації розглядається як задача пошуку за зразком (retrieval), яка вимагає:

- формування дискримінативного ознакового простору;
- використання ефективної метрики схожості;
- забезпечення узагальнюваності моделей на нові дані (переносимість).

Таким чином, з формальної точки зору, задача повторної ідентифікації полягає у побудові функції $f: \mathcal{I} \rightarrow \mathbb{R}^d$, яка мінімізує внутрішньокласову відстань:

$$\forall (I_i, I_j) \in \text{SameID}: d(f(I_i), f(I_j)) \rightarrow \min, \quad (6)$$

та максимізує міжкласову:

$$\forall (I_i, I_k) \in \text{DifID}: d(f(I_i), f(I_k)) \rightarrow \max, \quad (7)$$

В реальних системах до цього формулювання додаються додаткові обмеження: реальний час обробки, обмеженість пам'яті, змінність умов зйомки, відсутність маркованих даних у нових середовищах.

Це зумовлює актуальність розробки ефективних і стійких моделей, здатних працювати в умовах невизначеності та складних вхідних даних.

2. Виклики та перешкоди задачі повторної ідентифікації людини

Розв'язання задачі повторної ідентифікації людини в умовах реального середовища супроводжується низкою суттєвих технічних і прикладних викликів. Серед основних з них можна виокремити наступні [4]:

- висока варіативність зовнішнього вигляду людини. Одна й та сама особа може мати різний вигляд у різні моменти часу: змінюється одяг, взуття, зачіска, наявність або відсутність аксесуарів (наприклад, сумки, капелюхи, маски). Модель повинна бути здатною фокусуватися на сталих індивідуальних рисах, зберігаючи стійкість до несуттєвих змін зовнішності;

– *зміна умов зйомки в різних камерах.* Камери можуть відрізнятися кутом огляду, якістю зображення, рівнем освітлення, кольоровим балансом і фоновим шумом. Це ускладнює безпосереднє порівняння зображень і знижує якість обчислення схожості ознак;

– *часткове перекриття тіла або неповне входження в кадр.* Людина може бути частково закрита іншими об'єктами або потрапити в кадр лише частково. Це знижує ефективність виділення ознак і потребує застосування методів, здатних працювати з неповною інформацією;

– *схожість зовнішнього вигляду різних осіб.* У публічних місцях багато людей можуть мати подібні силуети або одяг. Це підвищує ризик хибних відповідей між різними особами та потребує побудови більш дискримінативного ознакового простору;

– *проблема переносу знань між різними доменами (domain shift).* Модель, навчена на одному датасеті, часто демонструє погану продуктивність на нових даних із відмінними характеристиками. Необхідне застосування методів доменної адаптації або навчання без учителя;

– *відсутність чітких біометричних ознак.* У більшості випадків обличчя особи або повністю відсутнє в кадрі, або має недостатню роздільну здатність для використання класичних методів біометричної ідентифікації. Це вимагає зосередження на непрямих ознаках – кольорах, формах, ході;

– *високі обчислювальні витрати.* Для обробки відеопотоків з багатьох камер у реальному часі потрібні обчислювальні ефективні алгоритми. Великі моделі можуть бути точними, але непридатними для застосування у ресурсно обмежених системах або на вбудованих пристроях;

– *етичні та правові обмеження.* Застосування технологій повторної ідентифікації пов'язане з ризиками порушення приватності, контролю за громадянами без їхньої згоди та зловживанням аналітичними можливостями. Це викликає необхідність забезпечення прозорості, регулювання та дотримання норм захисту персональних даних.

Таким чином, задача повторної ідентифікації людини виходить за межі суто технічної проблеми. Вона передбачає розв'язання комплексу питань – від інженерних і алгоритмічних до етичних і соціальних.

Успішне подолання вказаних викликів є запорукою ефективною інтеграції re-ID у повноцінні інтелектуальні системи відеоспостереження нового покоління.

3. Огляд підходів до вирішення задачі повторної ідентифікації людини

Підходи до повторної ідентифікації особи, як правило, використовують дескриптор зовнішності для представлення особи та функції зіставлення для порівняння цих дескрипторів зовнішності.

Протягом багатьох років робилися спроби покращити як представлення, так і алгоритм зіставлення, щоб підвищити стійкість до варіацій пози, освітлення та фону, притаманних цій проблемі.

Нещодавно, для повторної ідентифікації людини були застосовані підходи глибокого навчання, що дозволило досягти найсучасніших результатів [5].

Підходи глибокого навчання для ідентифікації особи спільно вивчають візуальні представлення ознак і метрику подібності. У літературі розпізнавання осіб здебільшого виконується за зовнішнім виглядом людини на одноколірних зображеннях [6].

Однак, багато підходів використовують інші ознаки для виконання завдання ідентифікації особи, такі як часова інформація, зображення глибини, хода, топологія камери тощо [7].

3.1 Підходи до вилучення ознак

Вилучення ознак – це фундаментальний крок у повторній ідентифікації особи, спрямований на створення надійних і дискримінаційних візуальних зображень людей. У даній статті традиційні методи поділяються на три основні підходи: холістичний, патч-орієнтований і виділення ознак на основі частин тіла [8].

Холістичні підходи часто використовують глобальні кольорові гістограми для опису зовнішності людей, а методи фотометричної нормалізації (наприклад, вирівнювання гістограми або функції передачі яскравості) застосовують для пом'якшення впливу освітлення та варіацій камери [9].

Підходи на основі патчів усувають обмеження цілісних ознак шляхом щільної вибірки локальних областей (наприклад, патчі 10×10) і вилучення дескрипторів, таких як гістограми LAB/HSV, SIFT, LBP або градієнтні ознаки [10]. Ці ознаки часто агрегуються за допомогою таких методів, як Bag-of-Words або локальне кодування координат для формування компактних, але інформативних зображень.

Підходи на основі частин тіла підвищують просторову стійкість, використовуючи структуру

людського тіла. Такі методи, як сегментація на основі симетрії (наприклад, SDALF) або горизонтальний поділ на смуги, спрямовані на вирівнювання та кодування семантично значущих областей, таких як тулуб або ноги [11]. Деякі методи поєднують ознаки на основі смуг і плям для покращення дискримінаційної здатності [12].

Додаткові стратегії включають використання коваріаційних дескрипторів, моделювання регіонів на основі Гаусса та вибір ознак на основі бустінгу [13].

Незважаючи на різноманітність цих методів, всі вони спрямовані на виявлення інваріантних і відмінних патернів у різних ракурсах камери для покращення ефективності повторної ідентифікації.

3.2 Підходи на базі зіставлення

Підходи на базі зіставлення при повторній ідентифікації особи зосереджені на вимірюванні схожості між представленнями ознак, витягнутими з різних зображень [14]. Оскільки традиційні метрики відстані, такі як евклідова відстань або відстань Бгаттачар'я, часто є недостатніми для обробки великих внутрішньокласових варіацій (наприклад, через зміну точки зору або освітлення), для підвищення надійності та дискримінаційної здатності застосовуються спеціалізовані методи зіставлення [15].

Важливим напрямком є метричне навчання, метою якого є вивчення функції відстані, пристосованої до завдання повторної ідентифікації людини. Більшість методів використовують махаланобісову відстань, параметризовану позитивною напіввизначеною (PSD) матрицею [16]. Безпосередня оптимізація цієї матриці може бути обчислювально трудомісткою, тому багато підходів розкладають її на підпростори меншої розмірності або застосовують обмеження для збереження опуклості. Методи метричного навчання можна умовно поділити на два типи [17]:

- оптимізація на основі обмежень на відстані, де цільова функція призначена для зближення схожих пар і розсування несхожих пар. Такі методи, як KISSME (Keep It Simple and Straightforward Metric), забезпечують ефективні рішення закритої форми, засновані на гауссівських припущеннях про простір ознак;

- дискримінативне навчання підпростору, метою якого є вивчення проєкції, де внутрішньокласова дисперсія мінімізується, а міжкласова максимізується. Приклади включають методи на основі LDA, LFDA (локальний дискримінантний аналіз Фішера), XQDA (який інтегрує QDA з KISSME) і NFST (нульове перетворення Фолі-

Саммона), яке проєктує зразки одного класу на спільну точку, максимізуючи при цьому міжкласову відокремлюваність [17].

Крім того, для покращення масштабованості та точності, були застосовані ансамблеві методи. Наприклад, ансамбль RankSVM формулює повторну ідентифікацію як задачу ранжування та агрегує декілька слабких SVM для зменшення обчислювальних витрат [18].

Загалом, підходи зіставлення доповнюють екстракцію ознак, уточнюючи спосіб вимірювання схожості, що відіграє життєво важливу роль у підвищенні точності ідентифікації в складних сценаріях перехресного ракурсу.

3.3 Підходи на базі глибинного навчання

Глибоке навчання значно вдосконалило повторну ідентифікацію людини, уможлививши спільне навчання представлень ознак і метрик схожості в наскрізний спосіб. На відміну від традиційних ручних функцій, згорткові нейронні мережі (CNN) автоматично вивчають дискримінаційні ознаки з необроблених даних зображення, що призводить до більш надійної роботи при зміні пози, освітлення та фону.

Підходи, засновані на глибокому навчанні, часто використовують структурні пріоритети, що застосовуються в класичних методах – наприклад, архітектури на основі смуг, патчів або частин тіла [19]. Моделі на основі смуг ділять вхідні зображення на горизонтальні області, припускаючи грубе вирівнювання між зображеннями людей. Наприклад, сіамські мережі зі спільними параметрами можуть порівнювати смуги незалежно один від одного, тоді як механізми вентилявання покращують відповідні характеристики на рівні смуг під час зіставлення [20].

Методи на основі частин тіла використовують інформацію про позу для вилучення та об'єднання ознак із семантично значущих областей (наприклад, голови, тулуба, ніг) [21]. Деякі моделі використовують мережі пропозицій областей тіла або просторові трансформантні мережі (STN) для локалізації частин тіла пішоходів без явних анотацій [22]. Інші використовують механізми уваги для автоматичного навчання дискримінативних областей тіла під час тренування, використовуючи кілька гілок мережі або вагові маски [23].

Щодо функцій втрат, глибокі моделі використовують парні втрати (наприклад, контрастні втрати), потрібні втрати або їхні комбінації (наприклад, квадруплетні втрати) для оптимізації схожості ідентифікації. Ці втрати покращують узагальнення моделі, зменшуючи внутрішньо-

класову дисперсію та збільшуючи міжкласову відокремлюваність у вивченому просторі вбудування [24].

Останні тенденції включають генеративні змагальні мережі (Generative Adversarial Networks, GAN) для доповнення навчальних даних або зменшення розривів між наборами даних, а також механізми уваги для вибіркового виділення важливих областей або кадрів (при повторній ідентифікації на основі відеозаписів) [25]. Ці вдосконалення вирішують такі проблеми, як дефіцит даних і варіації точок зору, ще більше підвищуючи продуктивність.

Таким чином, підходи глибокого навчання революціонізували вилучення та співставлення ознак при повторній ідентифікації особи, пропонуючи масштабовані, адаптивні та високодискримінаційні репрезентації за допомогою наскрізних навчальних фреймворків.

3.4 Інші підходи

Хоча більшість методів повторної ідентифікації людини покладаються на зовнішній вигляд RGB-зображення, інші ознаки можуть надати додаткову або більш надійну інформацію, особливо в складних умовах. У цьому пункті обговорюються альтернативні способи та контекстна інформація, які підвищують ефективність повторної ідентифікації.

Часова інформація, яку зазвичай отримують з відеопослідовностей, фіксує патерни руху, такі як хода. Ранні роботи використовували відео для віднімання фону або сегментації частин, тоді як більш сучасні методи агрегують ознаки на рівні кадру за допомогою стратегій об'єднання або вимірюють мінімальну відстань між послідовностями [26]. Детектори на основі ходи, такі як Gait Energy Images (GEI) або Flow Energy Profiles (FEP), використовують динаміку ходи, яка часто є унікальною для кожної людини. Глибокі рекурентні моделі (наприклад, RNN або LSTM) також використовуються для кодування часових залежностей для представлення на рівні послідовностей [27].

Біометричні ознаки – такі як риси обличчя, візерунки райдужної оболонки ока або відбитки пальців – пропонують високодискримінаційну інформацію про особу. Однак їхнє використання обмежене у спостереженні через потребу в зображеннях високої роздільної здатності, спеціалізованих сенсорах і суб'єктах, які співпрацюють. Тим не менш, атрибути обличчя, такі як зачіска або окуляри, досліджувалися як м'які біометричні ознаки для пошуку людей [28].

Методи, засновані на атрибутах, використовують семантичні дескриптори (наприклад, стиль одягу, колір або аксесуари), які є зрозумілими для людини і придатними для пошуку з нуля. Ці м'які біометричні ознаки забезпечують представлення середнього рівня, яке може доповнювати низькорівневі ознаки зовнішності [29].

Інформація про глибину і 3D-зображення, отримана за допомогою таких пристроїв, як бортова камера, дає змогу створювати зображення, що не залежать від точки зору і освітленості. Сигнали глибини сприяють кращій сегментації пішоходів і дозволяють виокремити скелетні та тривимірні ознаки форми тіла. Методи моделюють тіло, використовуючи довжину кінцівок, хмари точок або особливості скелета, іноді доповнені глибоким навчанням [30].

Топологія камер і мережеві обмеження також можуть допомогти в повторній ідентифікації шляхом включення просторово-часового контексту, наприклад, прогнозування ймовірних переходів камер або пішохідних шляхів на основі макета мережі.

Загалом, підходи на основі ознак спрямовані на подолання обмежень, пов'язаних лише з RGB-характеристиками зовнішності, шляхом включення багатшої, часто мультимодальної, контекстної або фізіологічної інформації для підвищення точності ідентифікації в складних середовищах [31].

4. Новітні тренди в задачі повторної ідентифікації людини

Нові тенденції у вирішенні задачі повторної ідентифікації цілком базуються на використанні глибокого навчання. Постійно пропонуються нові архітектури ШНМ. Ці нові ідеї дають деякі нові тенденції для застосування ШНМ до задачі повторної ідентифікації людини. Однією з таких тенденцій може бути генеративна змагальна мережа (GAN).

В задачах ідентифікації особи існує багато варіацій. Але через обмежений розмір наборів даних наведені приклади не можуть відображати всі можливі варіації. Деякі підходи розглядають використання генеративних моделей. Це моделі, які можуть навчитися створювати дані, подібні до даних, які ми надаємо. GAN було запропоновано в [32] і швидко застосовано до різних завдань. GAN навчає дві підмережі: генератор і дискримінатор. Дискримінатор виявляє, чи є зразок згенерованим або справжнім, тоді як генератор створює зразки, щоб обдурити дискримінатор.

В роботі [33], автори вперше застосували GAN до проблеми повторної ідентифікації. Ідея проста: використання згенерованих зображень для доповнення навчальних даних. Вони використовують глибоку згорткову генеративну змагальну мережу (DCGAN) для генерації зразків і базову CNN для навчання репрезентації. Експерименти показують, що додавання даних, згенерованих GAN, покращує вивчені вбудовування CNN.

В роботі [34], замість того, щоб генерувати довільні зображення пішоходів, автори пропонують генерувати зображення особи в різних позах з різними скелетами. Для накладання ідентичності згенерованих зображень пропонується модуль-провідник. В роботі [35] автори запропонували вирішити проблему розриву між доменами за допомогою GAN.

Ця проблема зазвичай існує між наборами даних, спричинена варіаціями налаштувань камери та умов зйомки. Це призводить до того, що модель, навчена на наявних навчальних даних, не може бути ефективно використана для нових тестових областей.

Щоб зменшити дорогі витрати на анування нових навчальних вибірок, автори виконали переклад зображень за допомогою GAN для подолання розриву між доменами, тобто перенесення зображень з одного домену в інший.

Інша тенденція – це механізм уваги. Моделі глибокого навчання без механізму уваги покладаються на всі зображення або всі кадри в послідовності зображень.

Однак, з одного боку, зміщення пішохода в обмежувальній рамці або зміна його пози може призвести до того, що деяким областям слід приділяти більше уваги, з іншого боку, через затемнення або зміну точок зору, для послідовності зображень деякі кадри є більш важливими.

З цією метою, автори роботи [36] запропонували спільно навчатися багаторівневій м'якій піксельній увазі та жорсткій регіональній увазі з одночасною оптимізацією представлення ознак. Автори роботи [37] об'єднують просторову і часову увагу в моделі просторово-часової уваги для вирішення проблем повторної ідентифікації людини на основі відео. Для просторової уваги використовується термін «пеналізація» для впорядкування множинної надлишкової уваги. Часова увага використовується для присвоєння ваг різним важливим областям на основі кожного кадру, щоб повною мірою використати переваги дискримінативних областей зображення.

Висновки

У статті було проведено комплексний аналіз сучасного стану та перспектив розвитку технологій повторної ідентифікації людини в інтелектуальних системах відеоспостереження. Встановлено, що задача re-ID є надзвичайно актуальною в контексті стрімкого поширення відеоаналітики для забезпечення громадської безпеки, моніторингу публічних просторів і побудови аналітичних платформ нового покоління.

Детально розглянуто формальну постановку задачі повторної ідентифікації, що ґрунтується на пошуку відповідностей між зображеннями однієї особи у багатовимірному ознаковому просторі. Показано, що центральним викликом є побудова дискримінативного, інваріантного до умов зйомки простору ознак, а також забезпечення здатності моделі до узагальнення на нові домени.

Проаналізовано основні виклики, що ускладнюють розв'язання задачі в реальних умовах, серед яких – варіативність зовнішнього вигляду, зміна освітлення і ракурсу, часткове перекриття, domain shift, відсутність біометричних ознак, а також обмеження обчислювальних ресурсів і вимоги до конфіденційності. Ці фактори зумовлюють потребу в розробці адаптивних, високопродуктивних та етичних систем повторної ідентифікації.

У статті узагальнено провідні підходи до вилучення ознак, включаючи холістичні, патч-орієнтовані та методи на основі частин тіла. Окремо проаналізовано підходи до зіставлення ознак на основі класичних та метричних методів, а також сучасні архітектури глибокого навчання. Показано, що використання CNN, attention-механізмів, трансформерів та генеративних моделей дозволяє суттєво підвищити точність повторної ідентифікації.

Окреслено новітні тенденції у цій галузі, зокрема застосування генеративних змагальних мереж (GAN) для доповнення навчальних даних та зменшення domain gap, а також впровадження механізмів просторової та часової уваги для покращення локалізації та динамічного аналізу.

Загалом, дослідження підтверджує, що сучасні методи, базовані на глибинному навчанні, відкривають широкі можливості для подальшого розвитку re-ID-систем. Водночас перспективними напрямками залишаються: підвищення стійкості моделей до змін середовища, оптимізація ресурсоспоживання, розробка мультимодальних підходів та створення етичних, прозорих і контрольованих систем відеоспостереження нового покоління.

Список використаної літератури:

1. L. Zheng, Y. Yang, and A. G. Hauptmann, *Person Re-identification: Past, Present and Future*, arXiv preprint arXiv:1610.02984, 2016. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1610.02984>
2. A. Angelova, A. Krizhevsky, and V. Vanhoucke, "Pedestrian detection with a Large-Field-Of-View deep network," in *Proc. 2015 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation (ICRA)*, Seattle, WA, USA, 2015, pp. 704–711. doi: 10.1109/ICRA.2015.7139256.
3. M. E. Chasmai and T. Banerjee, *Person Re-Identification*, arXiv preprint arXiv:2204.13158, 2022. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2204.13158>
4. H. Huang, D. Li, Z. Zhang, X. Chen, and K. Huang, "Adversarially Occluded Samples for Person Re-identification," in *Proc. 2018 IEEE/CVF Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Salt Lake City, UT, USA, 2018, pp. 5098–5107. doi: 10.1109/CVPR.2018.00535.
5. L. Ren, J. Lu, J. Feng, and J. Zhou, "Uniform and Variational Deep Learning for RGB-D Object Recognition and Person Re-Identification," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 28, no. 10, pp. 4970–4983, Oct. 2019. doi: 10.1109/TIP.2019.2915655.
6. J. Lin, L. Ren, J. Lu, J. Feng, and J. Zhou, "Consistent-Aware Deep Learning for Person Re-identification in a Camera Network," in *Proc. 2017 IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Honolulu, HI, USA, 2017, pp. 3396–3405.
7. L. Bazzani, M. Cristani, A. Perina, M. Farenzena, and V. Murino, "Multiple-Shot Person Re-identification by HPE Signature," in *Proc. 2010 20th Int. Conf. on Pattern Recognition (ICPR)*, Istanbul, Turkey, 2010, pp. 1413–1416. doi: 10.1109/ICPR.2010.349.
8. W. Li, X. Zhu, and S. Gong, *Harmonious Attention Network for Person Re-Identification*, arXiv preprint arXiv:1802.08122, 2018. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1802.08122>
9. Y. Yang, J. Yang, J. Yan, S. Liao, D. Yi, and S. Z. Li, "Salient Color Names for Person Re-identification," in *Computer Vision – ECCV 2014*, D. Fleet, T. Pajdla, B. Schiele, and T. Tuytelaars, Eds. Cham: Springer, 2014, pp. 536–551. doi: 10.1007/978-3-319-10590-1_35.
10. Y. Shen, W. Lin, J. Yan, M. Xu, J. Wu, and J. Wang, *Person Re-identification with Correspondence Structure Learning*, arXiv preprint arXiv:1504.06243, 2015. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1504.06243>
11. D. S. Cheng, M. Cristani, M. Stoppa, L. Bazzani, and V. Murino, "Custom Pictorial Structures for Re-identification," in *Proc. British Machine Vision Conference (BMVC)*, Dundee, UK, 2011.
12. D. Gray and H. Tao, "Viewpoint Invariant Pedestrian Recognition with an Ensemble of Localized Features," in *Computer Vision – ECCV 2008*, D. Forsyth, P. Torr, and A. Zisserman, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008, pp. 262–275. doi: 10.1007/978-3-540-88682-2_21.
13. T. Matsukawa, T. Okabe, E. Suzuki, and Y. Sato, "Hierarchical Gaussian Descriptor for Person Re-identification," in *Proc. 2016 IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Las Vegas, NV, USA, 2016, pp. 1363–1372. doi: 10.1109/CVPR.2016.152.
14. W. R. Schwartz and L. S. Davis, "Learning Discriminative Appearance-Based Models Using Partial Least Squares," in *Proc. 2009 XXII Brazilian Symp. on Computer Graphics and Image Processing (SIBGRAPI)*, Rio de Janeiro, Brazil, 2009, pp. 322–329. doi: 10.1109/SIBGRAPI.2009.42.
15. Z. Lin and L. S. Davis, "Learning Pairwise Dissimilarity Profiles for Appearance Recognition in Visual Surveillance," in *Advances in Visual Computing*, G. Bebis et al., Eds. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008, pp. 23–34. doi: 10.1007/978-3-540-89639-5_3.
16. A. Mignon and F. Jurie, "PCCA: A new approach for distance learning from sparse pairwise constraints," in *Proc. 2012 IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Providence, RI, USA, 2012, pp. 2666–2672. doi: 10.1109/CVPR.2012.6247987.
17. S. Pedagadi, J. Orwell, S. Velastin, and B. Boghossian, "Local Fisher Discriminant Analysis for Pedestrian Re-identification," in *Proc. 2013 IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Portland, OR, USA, 2013, pp. 3318–3325. doi: 10.1109/CVPR.2013.426.
18. B. J. Prosser, W. Zheng, S. Gong, and T. Xiang, "Person Re-Identification by Support Vector Ranking," in *Proc. British Machine Vision Conference (BMVC)*, Aberystwyth, UK, 2010.
19. D. Yi, Z. Lei, and S. Z. Li, *Deep Metric Learning for Practical Person Re-Identification*, arXiv preprint arXiv:1407.4979, 2014. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1407.4979>
20. R. R. Varior, M. Haloi, and G. Wang, "Gated Siamese Convolutional Neural Network Architecture for Human Re-identification," in *Computer Vision – ECCV 2016*, B. Leibe, J. Matas, N. Sebe, and M. Welling, Eds. Cham: Springer, 2016, pp. 791–808. doi: 10.1007/978-3-319-46484-8_48.

21. R. R. Varior, B. Shuai, J. Lu, D. Xu, and G. Wang, *A Siamese Long Short-Term Memory Architecture for Human Re-Identification*, arXiv preprint arXiv:1607.08381, 2016. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1607.08381>
22. J. You, A. Wu, X. Li, and W.-S. Zheng, "Top-Push Video-Based Person Re-identification," in *Proc. 2016 IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Las Vegas, NV, USA, 2016, pp. 1345–1353. doi: 10.1109/CVPR.2016.150.
23. D. Cheng, Y. Gong, S. Zhou, J. Wang, and N. Zheng, "Person Re-identification by Multi-Channel Parts-Based CNN with Improved Triplet Loss Function," in *Proc. 2016 IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Las Vegas, NV, USA, 2016, pp. 1335–1344. doi: 10.1109/CVPR.2016.149.
24. S. Ding, L. Lin, G. Wang, and H. Chao, *Deep Feature Learning with Relative Distance Comparison for Person Re-identification*, arXiv preprint arXiv:1512.03622, 2015. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1512.03622>
25. Z. Zheng, L. Zheng, and Y. Yang, *Unlabeled Samples Generated by GAN Improve the Person Re-identification Baseline in vitro*, arXiv preprint arXiv:1701.07717, 2017. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1701.07717>
26. N. Gheissari, T. B. Sebastian, and R. Hartley, "Person Reidentification Using Spatiotemporal Appearance," in *Proc. 2006 IEEE Computer Society Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, vol. 2, New York, NY, USA, 2006, pp. 1528–1535. doi: 10.1109/CVPR.2006.223.
27. Y. Yan, B. Ni, Z. Song, C. Ma, Y. Yan, and X. Yang, *Person Re-Identification via Recurrent Feature Aggregation*, arXiv preprint arXiv:1701.06351, 2017. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1701.06351>
28. D. A. Vaquero, R. S. Feris, D. Tran, L. Brown, A. Hampapur, and M. Turk, "Attribute-based people search in surveillance environments," in *Proc. 2009 Workshop on Applications of Computer Vision (WACV)*, Snowbird, UT, USA, 2009, pp. 1–8. doi: 10.1109/WACV.2009.5403131.
29. M. Munaro, A. Fossati, A. Basso, E. Mene-gatti, and L. Van Gool, "One-Shot Person Re-identification with a Consumer Depth Camera," in *Person Re-Identification*, S. Gong, M. Cristani, S. Yan, and C. C. Loy, Eds. London: Springer, 2014, pp. 161–181. doi: 10.1007/978-1-4471-6296-4_8.
30. A. Haque, A. Alahi, and L. Fei-Fei, *Recurrent Attention Models for Depth-Based Person Identification*, arXiv preprint arXiv:1611.07212, 2016. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1611.07212>
31. O. Javed, K. Rasheed, M. Shafique, and M. Shah, "Tracking across multiple cameras with disjoint views," in *Proc. Ninth IEEE Int. Conf. on Computer Vision (ICCV)*, vol. 2, Nice, France, 2003, pp. 952–957. doi: 10.1109/ICCV.2003.1238451.
32. I. J. Goodfellow, J. Pouget-Abadie, M. Mirza, B. Xu, D. Warde-Farley, S. Ozair, A. Courville, and Y. Bengio, *Generative Adversarial Networks*, arXiv preprint arXiv:1406.2661, 2014. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1406.2661>
33. J. Liu, B. Ni, Y. Yan, P. Zhou, S. Cheng, and J. Hu, "Pose Transferrable Person Re-Identification," in *Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Salt Lake City, UT, USA, June 2018.
34. L. Wei, S. Zhang, W. Gao, and Q. Tian, *Person Transfer GAN to Bridge Domain Gap for Person Re-Identification*, arXiv preprint arXiv:1711.08565, 2018. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1711.08565>
35. S. Liao, Y. Hu, X. Zhu, and S. Z. Li, *Person Re-identification by Local Maximal Occurrence Representation and Metric Learning*, arXiv preprint arXiv:1406.4216, 2015. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1406.4216>
36. S. Li, S. Bak, P. Carr, and X. Wang, *Diversity Regularized Spatiotemporal Attention for Video-based Person Re-identification*, arXiv preprint arXiv:1803.09882, 2018. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1803.09882>
37. R. Li, X. Yuan, W. Liu, and X. Xu, "Event-based Video Person Re-identification via Cross-Modality and Temporal Collaboration," in *Proc. ICASSP 2025 – IEEE Int. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, Hyderabad, India, 2025, pp. 1–5. doi: 10.1109/ICASSP49660.2025.10889628

State and Development of Human Re-Identification Technologies in Intelligent Video Systems

A. Kolpikov, E. Zabarna, M. Lobachev
Odesa Polytechnic National University

Abstract. The article discusses the current state and main directions of development of human re-identification (re-ID) technologies in intelligent video surveillance systems. The formal statement of the re-ID problem is defined and its role in ensuring continuous automatic monitoring of objects between non-overlapping cameras is characterized. The main challenges that complicate the solution of this problem in real conditions are analyzed, including variability of appearance, changes in angle and lighting, partial overlap, domain shift, limited training data and hardware resources. The paper summarizes the approaches to feature extraction, image matching, and deep learning methods used to build effective re-ID models. Particular attention is paid to current trends in the use of generative adversarial networks (GANs) and attention mechanisms that improve identification accuracy. Promising areas for further research, in particular in the field of multimodal learning, adaptation to new domains, and ethical implementation of technologies in public environments, are presented.

Keywords: person re-identification, intelligent video systems, computer vision, deep learning, feature space, metric learning, generative adversarial networks, attention mechanism.

Отримано 10.08.2025



Колпиков Андрій Сергійович, аспірант кафедри штучного інтелекту та аналізу даних, Національний університет «Одеська Політехніка»; проспект Шевченка, 1. Одеса, 65044, Україна.

E-mail: kolpikov.andrey@gmail.com

Kolpikov Andrii, PhD Student of Artificial Intelligence and Data Analysis Department, Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Avenue, Odesa, 65044, Ukraine.

E-mail: kolpikov.andrey@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0006-9116-7501>



Забарна Елеонора Миколаївна, доктор економічних наук, професор, зав. каф. інтегрованих технологій управління, Національний університет «Одеська Політехніка»; проспект Шевченка, 1. Одеса, 65044, Україна. E-mail: e.m.zabarna@op.edu.ua

Zabarna Eleonora, Doctor of Economics, Professor, Head of the Department of Integrated Management Technologies, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Avenue, Odesa, 65044, Ukraine. E-mail: e.m.zabarna@op.edu.ua

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2659-5909>



Лобачев Михайло Вікторович, кандидат технічних наук, професор, директор Інституту штучного інтелекту та робототехніки, Національний університет «Одеська Політехніка»; проспект Шевченка, 1. Одеса, 65044, Україна.

E-mail: lobachev@op.edu.ua

Lobachev Mykhaylo, Ph.D., Professor, Head of the Institute of Artificial Intelligence and Robotics, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Avenue, Odesa, 65044, Ukraine.

E-mail: lobachev@op.edu.ua

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4859-304X>

Method for Constructing an Asset-Conditioned Index of News Direction of Impact for Crypto Assets using Zero-Shot NLI and GDELТ

I. S. Uzun

Odesa Polytechnic National University

Abstract. This paper presents a reproducible pipeline for constructing asset-conditioned, direction-of-impact news sentiment for cryptocurrency markets. A multilingual news corpus is assembled using the GDELТ DOC 2.0 API, and a cross-lingual Natural Language Inference encoder is applied to judge whether a headline indicates a positive or negative effect on a given asset's price direction. The approach is zero-shot, meaning it does not require task-specific labeled data. It is language-agnostic and computationally efficient. The output includes per-article sentiment scores and daily indices per asset, suitable for descriptive analysis and for integration into decision-support contexts. The method is framed within research on cross-lingual inference and zero-shot classification and is designed for clarity, portability, and reproducibility.

Keywords: cryptocurrency, news analytics, sentiment analysis, zero-shot NLI, cross-lingual NLP, GDELТ, event-driven markets, volatility, decision-support systems, sentiment index

Introduction

Cryptocurrency markets react quickly to new information from traditional media and online platforms. Prior studies report links between the tone and content of news, trading activity, and volatility, although the size and duration of these effects differ across datasets, assets, and regimes [1, 2, 3]. Social media can carry strong signals and at times rivals or exceeds the influence of mainstream news, which underlines the need for transparent methods and careful interpretation [4].

This paper focuses on direction-of-impact sentiment. For each news item about an asset such as Bitcoin or Ethereum, we assess whether the content indicates a positive or negative impact on that asset's price direction. We operationalize this as a hypothesis-testing problem using cross-lingual Natural Language Inference. A headline is treated as a premise, while short label descriptions such as "this news is bullish for the price of Ethereum" serve as hypotheses. An encoder trained for multilingual NLI returns probabilities that the premise supports each hypothesis, which avoids task-specific labeling and works across many languages [5, 6, 7].

The paper makes three contributions. Firstly, it provides a simple, reproducible data pipeline that collects crypto-relevant news via the GDELТ DOC 2.0 API and stores a single, normalized file suitable for analysis [8]. Secondly, it defines an asset-

conditioned sentiment procedure based on zero-shot NLI and produces per-article scores along with daily indices for each asset, aligning with established zero- and few-shot formulations in the literature [9, 10, 7]. Thirdly, it delivers ready-to-use outputs designed for academic reporting and for integration into decision-support contexts. The scope is descriptive; future work can pair these measures with returns using event-study and related empirical designs [11, 12].

1. Literature review and related work

News and crypto markets. Empirical studies associate news tone and content with trading intensity, liquidity conditions, and volatility. Positive developments are often linked to increased activity, while negative news may raise perceived risk and uncertainty [1, 13, 14]. Forecasting papers show that including news-based indicators can improve volatility models relative to traditional baselines [2]. At the same time, several works highlight the role of social media sentiment, emphasizing that evidence is heterogeneous and sensitive to data sources and horizons [4, 3].

Recasting classification as textual entailment allows label assignment without task-specific training data. A model trained for NLI estimates whether an input supports a short natural-language label description. This approach has become a standard route to zero-shot text classification and can perform competitively when labels are well phrased and domains are not too distant from pretraining data [9, 10].

© Uzun I. S., 2025

Known caveats include sensitivity to label wording and domain shifts, which motivates clear reporting and robustness checks.

The XNLI benchmark established a shared testbed for multilingual inference and stimulated progress in cross-lingual transfer [5]. DeBERTa-v3 introduced training improvements that raised encoder quality, and multilingual variants fine-tuned on NLI demonstrate strong cross-lingual performance [6, 7].

Domain-adapted large language models for finance report strong results on sentiment and related tasks through domain pretraining and instruction tuning. These models are promising for future extensions but are heavier to run and reproduce than compact NLI encoders. For the goals of this paper - clarity, portability, and efficiency - a zero-shot NLI encoder offers a balanced choice while enabling future comparisons with finance-specific models [15, 16].

2. Data preparation

The corpus of news headlines used in this study was assembled through the GDELT DOC 2.0 interface. GDELT (Global Database of Events, Language, and Tone) is a large-scale monitoring platform that continuously indexes online news from thousands of outlets worldwide. It provides programmatic access to article-level metadata via public APIs. The DOC 2.0 endpoint, which is specifically designed for full-text discovery, returns for each item the canonical URL, the headline text, the time at which the aggregator observed the article, and source attributes such as the registrable domain, declared or detected language, and a country tag for the outlet. Because it covers multiple languages and regions in near real time and offers consistent metadata fields, GDELT is particularly suitable for constructing multilingual, time-stamped corpora for computational analysis.

News acquisition proceeds by defining, for each target asset, a compact set of keywords that balances recall and precision. For example, queries for Bitcoin use «bitcoin» and «btc», while those for Ethereum use «ethereum» and «eth». Similar lists are constructed for Solana, Binance Coin, Ripple, and Tether. Each query is executed over a clearly specified UTC time window, which can be either a fixed historical range for reproducible snapshots or a relative span for rolling updates. The interface accepts multilingual input and outputs records in JSON, which are ingested directly into a tabular structure. To respect service limits and maintain stability, short pauses are introduced between requests.

Returned items are normalized in several steps. Text fields are standardized to Unicode, URLs are validated for scheme and basic syntax, and timestamps are parsed into Coordinated Universal Time with timezone awareness. Each record is tagged with the asset that originated the query so that later sentiment modeling can be conditioned on the correct target. When an article mentions multiple assets, the dataset preserves one row per pair of article URL and asset, ensuring asset-specific analysis. Duplicates are removed at this pair level, and records with empty titles, invalid URLs, or unparseable timestamps are excluded. The consolidated table is sorted by observation time and stored in a compressed columnar format to support efficient access and exact reproducibility.

The schema is minimal but sufficient for multilingual news analytics. The *asset* field stores the uppercase code of the cryptocurrency associated with the row. The *title* field contains the headline as published and later serves as the textual premise in the inference step. The *url* field records the canonical link and functions as the primary identifier for deduplication; in some cases an alternative *url_mobile* link is also available. The *seendate* field holds the UTC timestamp observed by GDELT, providing a consistent anchor across outlets. The *domain* field specifies the registrable domain of the source, while the *language* and *source_country* fields record the detected language and the outlet's country association. An optional *social_image* field may include a preview image. For reproducibility, the *collected_at* field logs the local pipeline run time. During later analysis, derived fields such as a calendar day extracted from seendate, per-day article counts, and sentiment outputs are added in separate result files without altering the original ingest.

To ensure quality and reproducibility, the pipeline logs the run timestamp, library and code versions, query parameters, and per-asset record counts. It verifies that the corpus is non-empty, audits null proportions per column, and reviews the distribution of languages, source countries, and domains. Duplicate ratios are monitored to detect overly broad keyword sets. When preparing camera-ready datasets, both the query time window and the code version are frozen to guarantee exact replication.

A small illustrative sample demonstrates how records appear after normalization. Each line lists the UTC observation time, the target asset, the original headline, the source domain, and the outlet's country. Titles are preserved exactly as published, since these strings are the textual input for the inference model.

– 2025-08-25 11:30 UTC; SOL; Galaxy , Jump and Multicoins join forces for \$1b Solana buy; dailystar.com.lb; Lebanon;

– 2025-08-25 11:00 UTC; SOL; Crypto Giants Galaxy , Jump , Multicoins Look to Raise \$1B for Buying Solana SOL : Report; coindesk.com; United States;

– 2025-08-25 10:15 UTC; SOL; Analyst Says Solana Price Is At The Gates Of Massive Breakout , Here The Target; newsbtc.com; United States;

– 2025-08-25 04:45 UTC; SOL; 1 Brand - New Catalyst for Solana That Could Portend Great Returns Ahead; fool.com; United States;

– 2025-08-25 04:30 UTC; BTC; Top 3 Price Prediction : Bitcoin , Ethereum , Ripple – BTC and XRP hover near key supports while ETH consolidates after record highs; fxstreet.com; China.

This snapshot shows a coherent information burst around Solana on 25 August 2025 reported by multiple outlets and countries, along with a contemporaneous multi-asset market note. It illustrates the one-row-per-(url, asset) design, the consistent use of UTC timestamps for aggregation, and the multilingual, multi-source character of the dataset. These properties motivate the choice of a cross-lingual inference model for the subsequent sentiment analysis.

3. Methodology

The central methodological innovation of this work is the reformulation of financial news sentiment as a Natural Language Inference (NLI) problem. Rather than classifying headlines into generic positive or negative categories, each headline is evaluated relative to a target asset and with respect to price direction.

Formally, let P denote a news headline (premise) and a a target cryptocurrency asset. For each (P, a) pair we define two natural-language hypotheses:

$H_{bull}(a)$: “This news is bullish for the price of asset a .”

$H_{bear}(a)$: “This news is bearish for the price of asset a .”

The task is to assess whether the headline P entails, contradicts, or is neutral with respect to each hypothesis. A multilingual NLI encoder trained on large-scale datasets (XNLI, ANLI, etc.) provides the probabilistic judgments.

The encoder produces raw logits $z \in \mathbb{R}^3$ over classes $C = \{\text{entailment}, \text{neutral}, \text{contradiction}\}$. Applying the softmax function yields probabilities:

$$p(c | P, H) = \frac{\exp(z_c)}{\sum_{c' \in C} \exp(z_{c'})}$$

For each asset-conditioned hypothesis we define:

$$p_{bull} = p(\text{entailment} | P, H_{bull}(a)),$$

$$p_{bear} = p(\text{entailment} | P, H_{bear}(a)).$$

The directional sentiment score is then:

$$s = p_{bull} - p_{bear}, s \in [-1, 1].$$

– If $s \approx +1$, the headline strongly supports a bullish interpretation;

– If $s \approx -1$, the headline strongly supports a bearish interpretation;

– If $s \approx 0$, the evidence is weak or conflicting.

To provide a categorical label, we introduce a threshold parameter τ :

$$\text{label}(P, a) = \begin{cases} \text{bullish}, & \text{if } s > 0 \text{ and } \max(p_{bull}, p_{bear}) \geq \tau, \\ \text{bearish}, & \text{if } s < 0 \text{ and } \max(p_{bull}, p_{bear}) \geq \tau, \\ \text{neutral}, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

In our setup, $\tau = 0.5$. This conservative rule ensures that ambiguous cases remain neutral rather than forcing a bullish or bearish label.

Consider the headline observed on 2025-08-25: «Galaxy, Jump and Multicoins join forces for \$1b Solana buy»

This yields the pair $(P, a) = (\text{headline}, \text{SOL})$.

Hypotheses:

– $H_{bull}(\text{SOL})$: «This news is bullish for the price of Solana»;

– $H_{bear}(\text{SOL})$: «This news is bearish for the price of Solana».

The model outputs (illustrative values):

$$p(\text{entailment} | P, H_{bull}) = 0.84,$$

$$p(\text{entailment} | P, H_{bear}) = 0.07.$$

Thus,

$$s = 0.84 - 0.07 = 0.77.$$

Since $s > 0$ and $\max(p_{bull}, p_{bear}) = 0.84 > \tau$, the label is assigned as bullish.

Narratively, the headline explicitly mentions large institutional purchases of Solana, which the model correctly interprets as strongly supportive of the asset’s price.

Consider the headline observed on 2025-08-25: «Top 3 Price Prediction: Bitcoin, Ethereum, Ripple – BTC and XRP hover near key supports while ETH consolidates after record highs»

This headline enters the dataset three times, once each for BTC, ETH, and XRP.

For BTC:

$$p_{bull} = 0.22, p_{bear} = 0.64, s = -0.42 \Rightarrow \text{bearish.}$$

For ETH:

$$p_{bull} = 0.55, p_{bear} = 0.18, s = 0.37 \Rightarrow \text{bullish.}$$

For XRP:

$$p_{bull} = 0.24, p_{bear} = 0.61, s = -0.37 \Rightarrow \text{bearish.}$$

This example demonstrates how the one-row-per-(url, asset) structure allows a single article to contribute different directional signals depending on the asset focus.

Individual article scores are noisy and often redundant, especially when multiple outlets cover the same event. To extract consistent temporal patterns, we aggregate article-level scores into daily asset-level indices.

For asset a on day d with $N_{a,d}$ headlines:

$$S_{a,d} = \frac{1}{N_{a,d}} \sum_{i=1}^{N_{a,d}} s_i.$$

This daily index can be interpreted as the average directional sentiment expressed in the news flow.

To further smooth short-lived spikes and emphasize persistent trends, an exponentially weighted moving average (EWMA) is applied:

$$\tilde{S}_{a,d} = \frac{\sum_{k=0}^K \lambda^k S_{a,d-k}}{\sum_{k=0}^K \lambda^k}, 0 < \lambda < 1,$$

where λ is the decay factor and K the window length. A half-life of 2–3 days provides a balance between reactivity to shocks and noise reduction.

Advantages of the zero-shot NLI approach:

- No manual labeling: The method leverages entailment training on general-domain corpora, eliminating the need for expensive, domain-specific sentiment labels;

- Asset-conditioned interpretation: The sentiment signal is explicitly tied to an asset’s price direction, avoiding the ambiguity of generic «positive/negative» polarity;

- Multilingual coverage: The cross-lingual encoder can directly process headlines in many lan-

guages, reflecting the global scope of crypto markets without requiring machine translation;

- Interpretability: Each prediction can be explained by showing the headline, hypotheses, and entailment probabilities, which enhances transparency in academic and applied settings.

The process of deriving an asset-conditioned sentiment index from raw news headlines can be represented as a sequential pipeline:

- Headline (premise) – a news item is retrieved from the corpus and used as the textual premise;

- Hypothesis generation – for each target asset two short hypotheses are generated: «This news is bullish for the price of [asset]» and «This news is bearish for the price of [asset]»;

- NLI model inference – a cross-lingual encoder fine-tuned on natural language inference tasks evaluates the premise–hypothesis pairs and outputs probabilities for entailment, neutral, and contradiction;

- Probability extraction - the entailment probabilities for the bullish and bearish hypotheses are stored as p_{bull} and p_{bear} ;

- Score calculation - the scalar directional score is computed as $s = p_{bull} - p_{bear}$, ranging from -1 (strong bearish) to +1 (strong bullish);

- Label assignment – if the maximum probability exceeds a confidence threshold, the headline is labeled bullish or bearish; otherwise, neutral;

- Aggregation – article-level scores are aggregated by asset and day into daily indices, optionally smoothed with an exponentially weighted moving average.

Each record is one news item (typically a headline with a URL and metadata). The same article may be linked to more than one asset if the headline mentions multiple assets.

All timestamps are converted to Coordinated Universal Time to enable daily aggregation without ambiguity.

We keep all languages because the downstream classifier operates cross-lingually. Language tags are preserved for later descriptive analysis.

3. Results

The zero-shot NLI framework produced sentiment scores for each news item in the multilingual corpus, which were then aggregated into asset- and day-level indices. This section highlights the main descriptive findings, with a focus on the most extreme signals identified in the sample.

Across the full corpus, the majority of headlines were classified as *neutral*, reflecting the model’s

conservative design and the heterogeneous character of news coverage. Bullish and bearish labels were assigned when entailment probabilities surpassed the 0.5 confidence threshold, yielding subsets of articles with strong directional signals. The average sentiment scores were centered near zero, while tails contained news items with values close to ± 1 , corresponding to highly directional headlines.

The most negative headlines were concentrated in episodes of market stress and periods when mainstream outlets highlighted technical weakness or declining investor appetite. Representative examples include:

– 2025-05-28, *BTC*: «Bitcoin Price Forecast: BTC flashes early signs of weakness as profit-taking activity hits three-month high» (fxstreet.com), score = -0.99 ;

– 2025-06-14, *ETH*: «Ethereum Price Forecast: ETH maintains downtrend despite Sharp Link \$463 million purchase» (fxstreet.com), score = -0.99 ;

– 2025-06-03, *BTC*: «Bitcoin Price Forecast: BTC falls below \$106,000 as risk-off sentiment persists» (fxstreet.com), score = -0.99 ;

– 2025-07-16, *BNB*: «Binance Coin Price Prediction: Bearish Pressure Mounts After Sharp Rejection From \$710» (bravenewcoin.com), score = -0.99 .

These examples illustrate that the model reliably identified price-focused headlines with explicitly negative tone and framed them as strong bearish signals.

On the opposite tail, bullish sentiment was captured around news of institutional adoption, valuation upgrades, and optimistic forecasts. Examples include:

– 2025-07-17, *ETH*: «Ethereum Price Forecast: ETH surges above \$3,400 on back of robust treasuries, derivatives, and on-chain boost» (fxstreet.com), score = $+0.996$;

– 2025-08-08, *ETH*: «Ethereum Price Forecast: ETH surges above \$4,000, fueled by demand from treasury companies» (fxstreet.com), score = $+0.996$;

– 2025-08-03, *SOL*: «Solana Price Forecast: SOL Looking At 30% Upside In August, As Litecoin and Remittix Target 2–3x Gains» (news.az), score = $+0.995$;

– 2025-06-13, *ETH*: «Ethereum Price Forecast: ETH new valuation framework tags it digital oil, highlights an \$8,000 bull case» (fxstreet.com), score = $+0.995$.

These results indicate that the system responded strongly to upward-facing narratives, especially those associated with Ethereum during mid-2025, where multiple outlets highlighted fundamental and technical drivers of appreciation.

When aggregated to daily indices, short-lived bursts of bullish or bearish sentiment became apparent. For example, clusters of bearish headlines were visible around early June 2025 for Bitcoin and Ethereum, coinciding with reported drawdowns and profit-taking episodes. In contrast, Ethereum and Solana registered consecutive days of highly bullish sentiment during July and August 2025, corresponding to news of surging institutional demand and favorable valuation analyses.

Overall, the results demonstrate that the zero-shot NLI approach produces consistent and interpretable measures of directional news sentiment. By conditioning on specific assets, the method differentiates between bullish and bearish signals even when multiple cryptocurrencies are discussed in the same article. The high-scoring extremes provide an intuitive validation of the model's behavior, aligning with market narratives reported in financial media.

Figure 1 shows the exponentially weighted moving average (EWMA) of daily sentiment indices for six major assets. Ethereum (ETH) exhibited the most pronounced swings, with very strong bullish sentiment in early June followed by a correction, then another peak in mid-July before trending downward in August. Bitcoin (BTC) hovered around neutral to mildly positive values, while Solana (SOL) showed a gradual increase through July and August. Binance Coin (BNB), Ripple (XRP), and Tether (USDT) remained closer to neutrality, though XRP had occasional bullish bursts. This suggests that Ethereum and Solana were most strongly covered by directional news narratives, while stablecoins and secondary assets generated less polarized coverage.

Figure 2 presents the histogram of per-article sentiment scores. The distribution is tri-modal: a dense cluster near zero (neutral or ambiguous news), and sharp peaks near -1 and $+1$ (strongly directional headlines). This confirms that the model was conservative in assigning direction, but when confident, it placed articles firmly at the extremes. The prevalence of scores at both tails also demonstrates that the approach captured strongly bullish and bearish headlines across different assets.

Figure 3 plots the daily count of headlines per asset. Coverage was uneven and episodic: Bitcoin and Ethereum received steady attention throughout the period, but Solana and Binance Coin saw bursts of activity tied to specific events (for example, institutional investment announcements or technical breakouts). Ripple (XRP) showed periodic spikes, reflecting its sensitivity to regulatory and market news. USDT coverage remained sporadic, dominated by occasional stability reports or controversies.

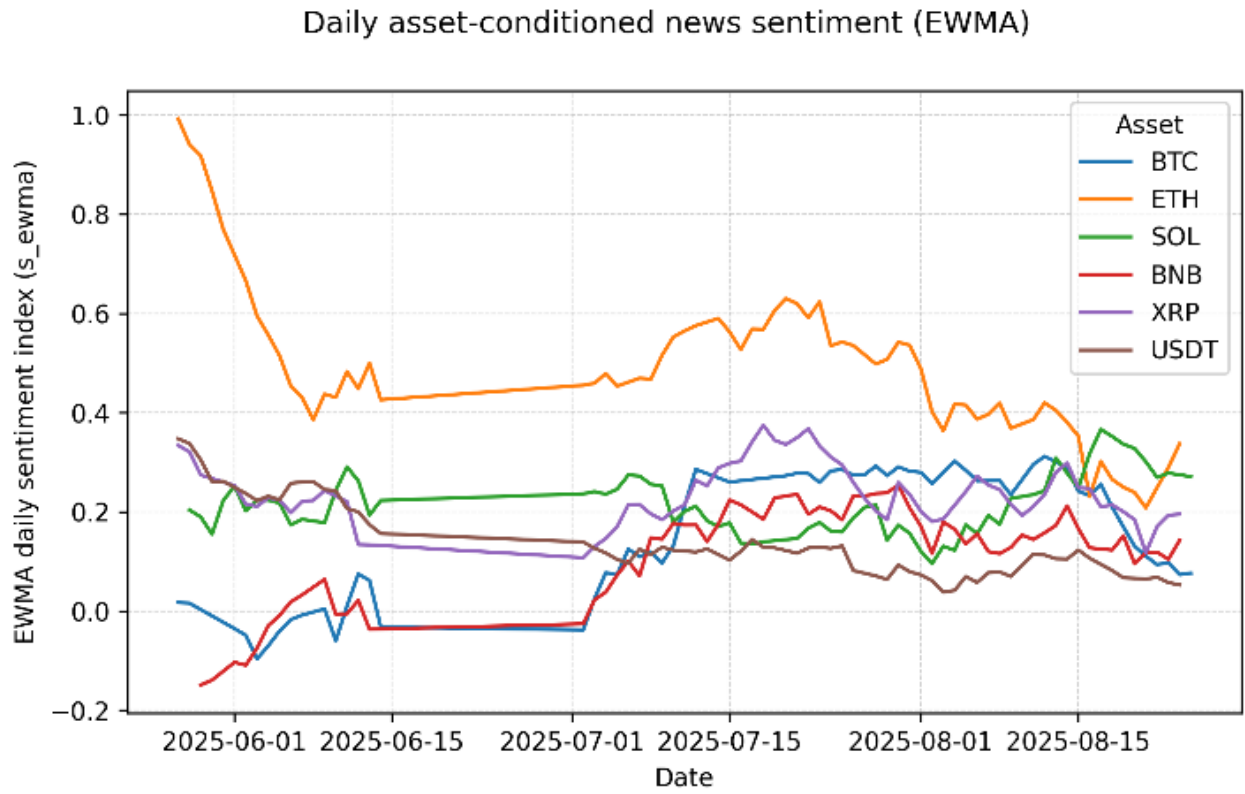


Fig. 1. Daily asset-conditioned news sentiment

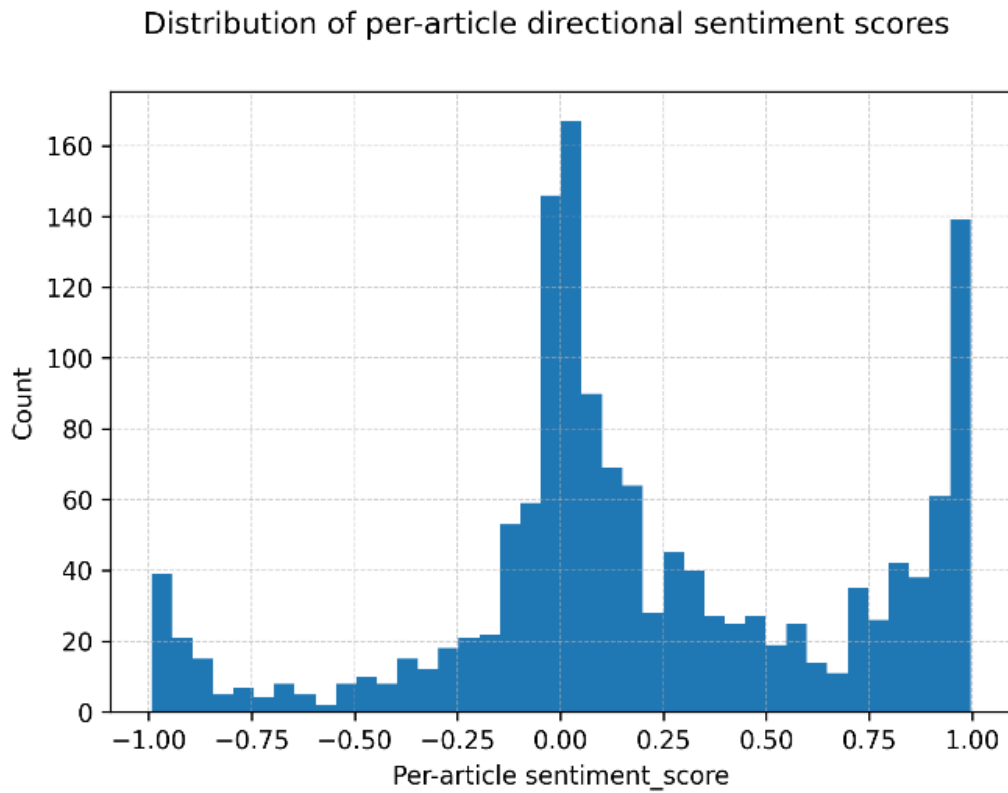


Fig. 2. Distribution of per-article sentiment scores

Daily news volume by asset

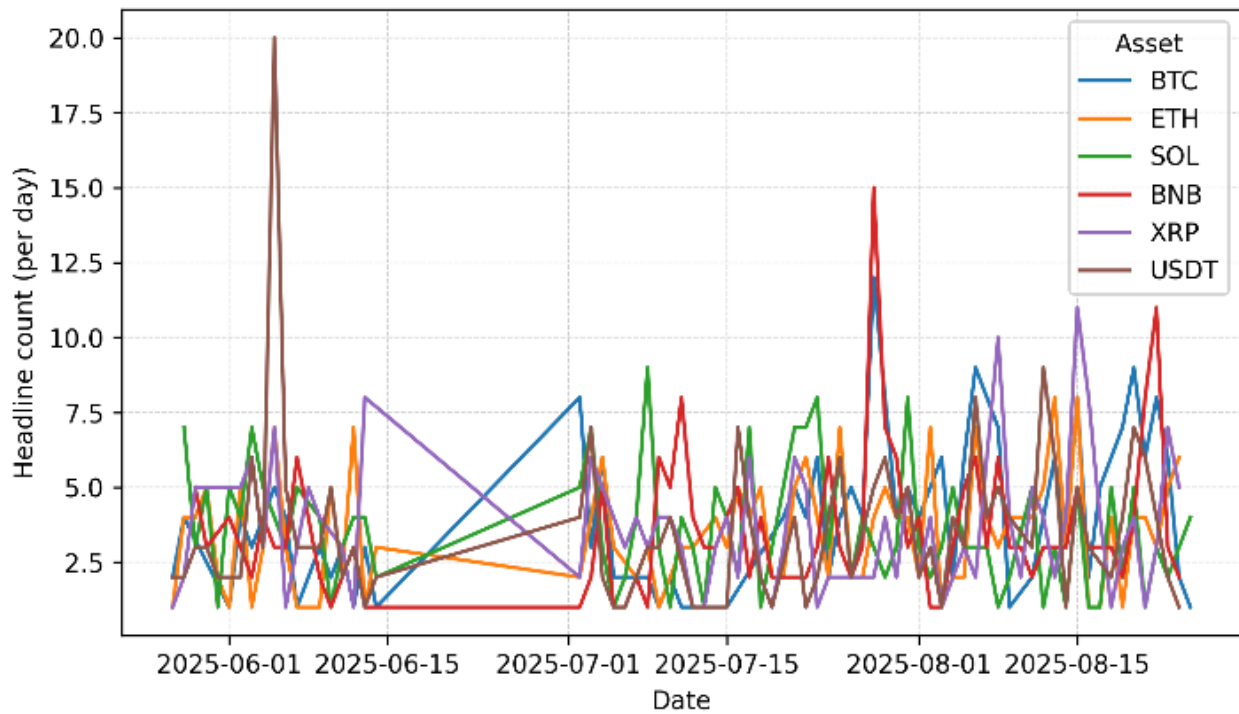


Fig. 3. Daily news volume by asset

The uneven distribution underscores the necessity of asset-conditioned analysis, since event-driven bursts strongly influence the aggregate indices.

Figure 4 summarizes the average sentiment scores of the most extreme bullish and bearish head-

lines for each asset. All six assets display symmetrical behavior: their top bullish headlines score near +1, while their top bearish headlines score near -1.

This validates that the model can confidently classify highly directional items across the asset set.

Extremes by asset: mean of top-k bullish vs. bearish headlines

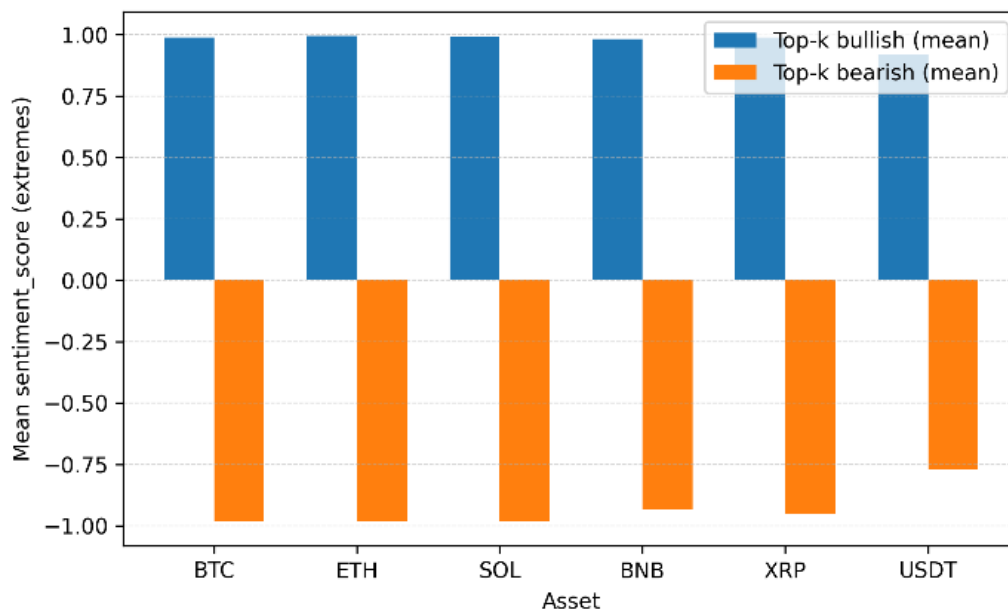


Fig. 4. Extremes by asset

The strongest bullish extremes were observed for Ethereum and Solana, while the most negative bearish headlines were concentrated in Bitcoin and Binance Coin. This aligns with the qualitative examples presented earlier and indicates that the methodology captures clear market narratives.

Taken together, these results highlight three key properties of the proposed approach. First, the NLI-based framework produces intuitive article-level scores that align with human expectations of bullish and bearish language. Second, aggregating to daily indices reveals asset-specific sentiment dynamics and event-driven bursts. Third, the combination of conservative neutrality with strong extremes ensures that the indices are both interpretable and robust, avoiding over-classification while still capturing meaningful signals.

4. Discussion

The results demonstrate that a zero-shot NLI approach to cryptocurrency news sentiment is feasible, interpretable, and reproducible across multiple assets and languages. Several aspects merit further discussion:

Unlike opaque black-box classifiers trained on proprietary data, the NLI-based framework relies on a simple, transparent mapping: each headline is tested against explicit hypotheses formulated in natural language. This design allows researchers and practitioners to trace back each sentiment score to the original textual evidence and the logical entailment relation, thus satisfying academic standards for interpretability. Moreover, the framework avoids reliance on subjective lexicons or domain-specific annotation, which often introduce biases and reduce portability.

A key innovation of this work is the explicit conditioning of sentiment on specific assets. Generic polarity classifiers, when applied to financial text, often misclassify because «positive» news in a general sense may not be «positive» for the price of a given cryptocurrency. By anchoring the hypotheses to each asset (e.g., «bullish for Bitcoin»), the proposed method ensures that sentiment always reflects expected price direction rather than general tone. This is particularly valuable in multi-asset news items, where one article can carry distinct signals for Bitcoin, Ethereum, and Ripple simultaneously.

The descriptive analyses highlight the uneven coverage of assets in global news flows. Bitcoin and Ethereum remain the most reported, but Solana, Binance Coin, and Ripple exhibit episodic spikes tied to market events. Stablecoins such as USDT show sparse coverage, often tied to crises or major policy changes. This heterogeneity emphasizes the

need for daily aggregation and smoothing, as raw per-article sentiment would otherwise reflect noise from unequal coverage volumes. It also illustrates the importance of reproducible data acquisition pipelines that can capture bursts without manual curation.

The distribution of scores is tri-modal, with peaks near neutrality and both extremes. This pattern is desirable: neutrality dominates when headlines are ambiguous, while confident extremes emerge when headlines carry unambiguous market narratives. The prevalence of strong tails suggests that the NLI model is sensitive to explicit financial phrasing (e.g., «surges above \$4,000» or «flashes early signs of weakness»), which is common in financial journalism. However, it also implies that the model's calibration is highly dependent on hypothesis phrasing; future work could systematically test alternative hypothesis formulations to ensure robustness.

Several limitations must be acknowledged. First, the NLI encoder was not trained specifically on financial text; its performance may degrade for idiomatic or technical financial expressions absent from general-domain corpora. Second, although multilingual, the model's accuracy is likely higher in English than in low-resource languages. Third, the aggregation procedure assumes equal weight per article, whereas in practice some outlets or article types may have disproportionate market impact. Finally, while sentiment indices are plausible descriptive indicators, linking them rigorously to price returns or volatility requires careful event-study or causal designs, which are beyond the scope of this paper.

Recent advances such as FinGPT and FinTral illustrate the potential of domain-pretrained large models for financial tasks. These models often outperform general-purpose encoders in downstream benchmarks. However, their computational cost, reproducibility constraints, and proprietary training data limit academic accessibility. By contrast, the zero-shot NLI approach is lightweight, reproducible, and language-agnostic. A promising future direction is to benchmark the two approaches side by side, assessing whether the interpretability and efficiency of NLI can complement the domain-specific strengths of financial LLMs.

From a systems perspective, the proposed method aligns with the goals of risk-oriented decision-support in volatile markets. A pipeline that translates raw multilingual headlines into daily sentiment indices can be integrated into portfolio dashboards, early warning systems, or automated trading environments. Because the approach is modular and transparent, it can be combined with technical indicators, blockchain analytics, or causal inference

models to provide holistic, explainable decision-support.

Conclusion

This study introduced a reproducible methodology for constructing asset-conditioned sentiment indices from cryptocurrency news using a zero-shot Natural Language Inference framework. By framing sentiment classification as an entailment task, the method avoids reliance on task-specific labels, provides multilingual coverage, and delivers transparent and interpretable outputs.

Empirical results demonstrate that the approach successfully captures both strongly bullish and bearish narratives, while assigning neutrality in ambiguous cases. Aggregated daily indices reveal asset-specific sentiment dynamics and event-driven bursts, particularly for Ethereum and Solana during mid-2025. The distribution of scores confirms that the framework balances conservatism with sensitivity to clear signals, producing indices that align with journalistic narratives and market episodes.

The main contributions of this work are three-fold: (i) the design of an asset-conditioned, zero-shot sentiment methodology anchored in NLI, (ii) the implementation of a reproducible data acquisition and normalization pipeline based on GDELT, and (iii) the demonstration of descriptive results that confirm the plausibility and interpretability of the indices.

Future research should pursue several directions. First, systematic comparisons with domain-specific financial LLMs can clarify performance trade-offs and highlight the complementary roles of efficiency and domain adaptation. Second, the integration of weighting schemes (by source credibility, readership, or social amplification) could refine the aggregation of sentiment signals. Third, causal analyses linking sentiment indices to price movements, volatility regimes, and trading volume would provide stronger evidence of predictive utility. Finally, extending the pipeline to include social media, blockchain transaction data, or alternative media channels would broaden its scope for multi-source risk-oriented decision support.

In conclusion, the proposed zero-shot NLI pipeline represents a practical, academically transparent, and globally applicable method for translating heterogeneous news flows into structured sentiment indices. Its interpretability, portability, and reproducibility make it a strong candidate for integration into next-generation information systems for financial analytics and decision-support in cryptocurrency markets.

References

1. Kulbhaskar A. K., Anamika, Subramaniam S. Breaking news headlines: Impact on trading activity in the cryptocurrency market. *Economic Modelling*, 2023, 126. DOI: 10.1016/j.econmod.2023.106397. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0264999323002092> (accessed 25.08.2025).
2. Brauneis A., et al. Crypto volatility forecasting: Mounting a HAR, sentiment, and ML challenge. *Computational Economics*, 2024. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10690-024-09510-6> (accessed 25.08.2025).
3. Long S. C., et al. From whales to waves: Social media sentiment, volatility and crypto market dynamics. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 2025. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890838925001325> (accessed 25.08.2025).
4. Canayaz M., Cao C., Nguyen G., Wang Q. An anatomy of cryptocurrency sentiment. *SSRN Electronic Journal*, 2023. DOI: 10.2139/ssrn.4495683. Available at: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4495683 (accessed 25.08.2025).
5. Conneau A., Lample G., Rinott R., Williams A., Bowman S. R., Schwenk H., Stoyanov V. XNLI: Evaluating cross-lingual sentence representations. In: *Proceedings of EMNLP*, 2018. Available at: <https://aclanthology.org/D18-1269/> (accessed 25.08.2025).
6. He P., Gao J., Chen W. DeBERTaV3: Improving DeBERTa using ELECTRA-style pre-training with gradient-disentangled embedding sharing. arXiv:2111.09543, 2021. Available at: <https://arxiv.org/abs/2111.09543> (accessed 25.08.2025).
7. Laurer M. mDeBERTa-v3-base-XNLI-multilingual-nli-2mil7: Model card. Hugging Face, 2022–2025. Available at: <https://huggingface.co/MoritzLaurer/mDeBERTa-v3-base-xnli-multilingual-nli-2mil7> (accessed 25.08.2025).
8. GDELT Project. GDELT DOC 2.0 API debuts. 2017. Available at: <https://blog.gdeltproject.org/gdelt-doc-2-0-api-debuts/> (accessed 25.08.2025).
9. Yin W., Hay J., Roth D. Benchmarking zero-shot text classification: Datasets, evaluation and entailment approach. In: *Proceedings of EMNLP*, 2019. Available at: <https://aclanthology.org/D19-1404/> (accessed 25.08.2025).

10. Wang S., Fang H., Khabisa M., Mao H., Ma H. Entailment as few-shot learner. arXiv:2104.14690, 2021. Available at: <https://arxiv.org/abs/2104.14690> (accessed 25.08.2025).
11. Nguyen N. How event studies can be applied to crypto markets. The Brattle Group, 2023. Available at: <https://www.brattle.com/wp-content/uploads/2023/07/How-Event-Studies-Can-Be-Applied-to-Crypto-Markets.pdf> (accessed 25.08.2025).
12. Zhou F. Application of event study methodology in the analysis of cryptocurrency returns. Emerging Markets Finance and Trade, 2024. DOI: 10.1080/1540496X.2024.2404173. Available at: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/1540496X.2024.2404173> (accessed 25.08.2025).
13. Yue W., et al. Asymmetric news effects on cryptocurrency liquidity. International Review of Economics & Finance, 2021. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1544612320316135> (accessed 25.08.2025).
14. Haider Ali H., et al. Return and volatility spillover between cryptocurrencies, oil price and stock market in GCC countries. Cogent Economics & Finance, 2025. Available at: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/23322039.2025.2453584> (accessed 25.08.2025).
15. Yang H., Liu X., Wang C. D. FinGPT: Open-source financial large language models. arXiv:2306.06031, 2023. Available at: <https://arxiv.org/abs/2306.06031> (accessed 25.08.2025).
16. Bhatia G., Nagoudi E. M. B., Cavusoglu H., Abdul-Mageed M. FinTral: A family of GPT-4-level multimodal financial large language models. Findings of ACL, 2024. DOI: 10.18653/v1/2024.findings-acl.774. Available at: <https://aclanthology.org/2024.findings-acl.774.pdf> (accessed 25.08.2025).

Метод побудови актив-зумовленого індексу напрямку новинного впливу для криптоактивів на основі zero-shot NLI та GDELT

I. С. Узун

Анотація. У роботі подано відтворюваний конвеєр побудови напрямленого новинного сентименту, зумовленого конкретним активом, для ринку криптовалют. Мультимовний корпус новин формується за допомогою GDELT DOC 2.0, після чого застосовується крос-мовна модель логічного висновування (NLI), яка оцінює, чи вказує заголовок на позитивний або негативний вплив новини на напрям руху ціни заданого активу. Підхід є zero-shot і не потребує спеціально розмічених даних; він мовно незалежний та обчислювально осядливий. Результат включає постатейні оцінки сентименту та денні індекси за активами, придатні для описового аналізу та інтеграції у контексти підтримки прийняття рішень. Метод вписано в дослідження з крос-мовного висновування та zero-shot класифікації і спроектовано з акцентом на прозорість, портативність і відтворюваність.

Ключові слова: криптовалюти, аналітика новин, сентимент-аналіз, zero-shot NLI, крос-мовна обробка природної мови, GDELT, подієво-орієнтовані ринки, волатильність, системи підтримки прийняття рішень, індекс сентименту

Отримано 01.09.2025



Illia Uzun, PhD student at the Institute of Artificial Intelligence and Robotics, Senior Lecturer at the Department of Artificial Intelligence and Data Analysis, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Avenue, Odesa, 65044, Ukraine. E-mail: uzun.illia.main@gmail.com, ph.: +38 067 917 2040

Узун Ілля Святославович, аспірант Інституту Штучного Інтелекту та Робототехніки, старший викладач кафедри Штучного Інтелекту та Аналізу Даних, Національний університет «Одеська політехніка»; проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна. E-mail: uzun.illia.main@gmail.com, тел. +38 067 917 2040

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6619-4862>

Аналіз особливостей виконання диференційних захистів ліній електропередач надвисокої напруги

А. К. Топор, М. Ю. Шабовта

Національний університет «Одеська політехніка»

Анотація. У цій статті проаналізовано світовий досвід вдосконалення диференційних захистів та представлено порівняльний аналіз високочастотних захистів для ліній надвисокої напруги, а саме диференційно-фазний струмовий захист та направлений високочастотний захист. Виявлено складнощі у впровадженні алгоритму роботи диференційно-фазного захисту у цифрових терміналах саме для довгих ліній надвисокої напруги. В результаті аналізу науко-технічної літератури було підтверджено актуальність зазначеної проблеми. Для її вирішення запропоновано поглиблений аналіз роботи релейного захисту оснований на цифровій елементній базі за допомогою математичного моделювання роботи ліній надвисокої напруги.

Ключові слова: релейний захист, диференційний захист, диференційно-фазний захист, високочастотний захист, лінія електропередачі надвисокої напруги, перехідні процеси, короткі замикання, моделювання, енергосистема.

Вступ

У зв'язку із бурхливим розвитком нових технологій та застосуванні їх в енергетичній сфері на даний час є необхідність пошуку нових рішень для впровадження їх в засоби релейного захисту. Із розвитком цифрових технологій та застосування їх для релейного захисту ліній електропередачі виникає необхідність постійного аналізу їхньої роботи та вдосконалення принципів виконання захистів. В залежності від параметрів ліній електропередачі та каналів зв'язку між її кінцями, а також вимог до стійкості енергосистеми, застосовуються відповідні захисти.

На даний час вже виконана реалізація типових диференційних захистів на базі цифрових пристроїв. Але із подальшим розвитком енергомереж, пов'язаним із збільшенням застосування відновлювальних джерел енергії, використання розподіленої генерації, а також передачі великої потужності на великі відстані, типові захисти не завжди забезпечують умови селективності та швидкодії.

В сучасній об'єднаній енергосистемі (ОЕС) України для передачі великої потужності застосовуються мережі надвисокої напруги (НВН) 330-750 кВ. Це дозволяє зменшити струми навантаження, а також втрати потужності при передачі електроенергії.

© Топор А. К., Шабовта М. Ю., 2025

Дуже важливим фактором роботи об'єднаної енергосистеми є її стійкість. На стійкість енергосистеми впливає час вимикання пошкоджень її елементів та селективність такого вимкнення. Тому для мереж НВН необхідно застосовувати захисти із найменш можливим часом спрацьовування та абсолютною селективністю. До таких захистів відносяться диференційні захисти (ДЗ).

1. Постановка проблеми

Необхідність заміни застарілих електромеханічних пристроїв захисту на сучасні цифрові пристрої вимагає детального аналізу алгоритму його роботи. Наразі є складнощі у впровадженні алгоритму роботи диференційно-фазного захисту (ДФЗ) у цифрових терміналах для довгих ліній НВН. Лінії даної напруги мають велику ємнісну складову, що призводить до появи складних перехідних процесів. Ці процеси впливають як на величину вимірюваних параметрів, так і на якість сигналу, який передається високочастотним каналом (ВЧ). Це впливає на селективність роботи та збільшення часу спрацьовування захистів, що зменшує стійкість енергосистеми.

Можна виділити пов'язані із цим основні проблеми:

– можливе зайве спрацьовування ДФЗ при зовнішніх несиметричних коротких замиканнях (КЗ) за рахунок появи ємнісного струму лінії на кінці, що ближче до місця пошкодження;

- значні перешкоди при передачі сигналів ВЧ каналом на довгих лініях електропередачі НВН сприяють зміні значення сигналу і хибним спрацьовуванням захисту.

Для забезпечення правильної роботи захистів протягом десятиліть проводились вдосконалення електромеханічних та напівпровідникових пристроїв захисту. Досвід використання та експлуатації таких типів захистів на базі цифрових пристроїв показує потребу в їх постійному доопрацюванні. Тому, це питання потребує подальшого поглибленого вивчення та детального аналізу.

2. Огляд літератури

Іноземні джерела інформації

Для вдосконалення роботи диференційних захистів, в даній статті проаналізовано досвід закордонних та вітчизняних фахівців.

У роботі [1] розглядається направлений захист із високочастотним блокуванням (НВЧЗ) для ліній електропередачі, які з'єднують великі вітрові електростанції з енергосистемою.

Автори наголошують про вплив відновлювальних джерел енергії порівняно із традиційними системами генерації електроенергії на перехідний процес при КЗ. Ця ситуація погіршує надійність традиційних дистанційних і диференційних захистів ліній електропередачі. Тому для подолання цих проблем було запропоновано нову схему захисту з локально вимірювальних сигналів напруги та струму з використанням високочастотних складових, що генеруються внаслідок виникнення пошкодження. Запропонована схема захисту не вимагає алгоритму компенсації ємнісного струму лінії. Результати моделювання підкреслюють надійність та безпеку запропонованої схеми захисту за різних умов випробувань для ліній довжиною до 200 км.

У статті [2] наведений новий принцип захисту для ліній, які з'єднують великі вітрові електростанції. Коливання вихідної потужності вітрових електростанцій (ВЕ) та їхні характеристики перехідних процесів короткого замикання негативно впливають на системи диференційного захисту. Зі збільшенням довжини лінії електропередачі та у випадку слабкої вихідної потужності від ВЕ, диференційний струм між обома кінцями лінії збільшується в нормальних умовах, оскільки ємнісний струм сумірний зі струмом навантаження. У цій статті пропонується новий алгоритм диференційного захисту для таких ліній електропередачі. Запропонований алгоритм диференційного струмового захисту розроблено на основі знаків фазного струму на обох кінцях

лінії, замість безпосереднього використання величин струму.

Вивчення перехідних процесів при КЗ має вирішальне значення для підвищення ефективності захисту ліній вітрових електростанцій. Це наголошується в роботах [3], [4], [5]. В них розглядається метод аналізу частотної складової диференційного струму у вітровій електростанції та порівняння із складовою основної промислової частоти. Автори кількісно аналізують домінуючу частотну складову диференційного струму замикання у лінії на основі методу еквівалентної лінії із зосередженими параметрами та частотного імпедансу вітрової електростанції. Порівняно з диференційним захистом промислової частоти, ця схема підвищує швидкість роботи захисту та чутливість. Щоб уникнути негативного впливу від насичення трансформаторів струму, для дії захисту використовується проміжок часу менший 5 мс.

Запропонована схема ДЗ від перехідних процесів нова та потребує впровадження та подальшого аналізу в реальних умовах.

В роботах [6], [7] розглядається покращена схема захисту лінії електропередачі на основі біжучої хвилі. Традиційні методи захисту основані на біжучої хвилі мають обмеження щодо надійності та швидкості для ліній надвисокої напруги. Запропонована схема для підвищити надійність та ефективність механізму захисту використовує співвідношення між хвилями, що біжать від місця пошкодження, а саме відбитими хвилями та заломленими хвилями на кінці лінії. Надійність запропонованої схеми захисту перевірено та підтверджено за допомогою експериментів, проведених на цифрово-аналоговій тестовій платформі стимулятора реального часу. Порівняльний аналіз захистів ліній НВН мереж змінного та постійного струмів виконано у роботі [8]. Системи змінного струму високої напруги (ВНЗС) та постійного струму високої напруги (ВНПС) є важливими для ефективного переходу енергії та електрифікації, що створює значні труднощі для забезпечення надійності та безпеки електроенергетичних мереж. Різні сценарії пошкоджень були протестовані за допомогою файлів COMTRADE, що виявило важливі особливості при порівнянні підходів до захисту на основі імпедансу та біжучої хвилі, щоб виділити сильні та слабкі сторони обох підходів до захисту. У цій статті були розглянуті дві схеми захисту для біполярних систем високовольтного постійного струму з використанням теорії біжучої хвилі та модального перетворення. Схема захисту на основі біжучих хвиль менш

вразлива до спрацьовування нестабільних операцій за різних сценаріїв пошкодження.

У роботі [9] та [10] наведені нові принципи виконання диференційних захистів для ліній надвисокої напруги підключених до джерел відновлювальної енергії. Запропоновані схеми використовують модель Бержерона для усунення впливу розподіленого ємнісного струму та новий принцип адаптивного диференційного захисту на основі амплітудної та фазової компенсації. Результати моделювання за різних умов у середовищі Matlab/Simulink демонструють, що принцип захисту може добре адаптуватися до різних режимів роботи електростанції.

У статті [11] розглядаються постійні виклики до підвищення надійності роботи розподільчих систем та вимоги до схеми захисту для забезпечення надійної та стійкої роботи енергетичної систем. Огляд літератури, представлений у цій статті, показує, що виклики та можливості для захисту виникають у багатьох різних областях, включаючи нові стандарти поєднання розподілених енергетичних ресурсів (PER), зміни в роботі системи та здатність експлуатувати системи як реконфігуровані мережі з штатним режимом острівкування.

Вітчизняні джерела інформації

У зв'язку з тим що в Україні вже багато років експлуатуються височастотні захисти для ліній 330-750 кВ, далі розглядаються наукові праці вітчизняних авторів пов'язані із особливостями саме височастотних захистів.

Питання височастотних диференційно-фазних та направлених захистів ліній електропередачі досить широко розглянуто в навчальних посібниках релейного захисту Федосєєва О. М. та Кідиби В. П. У цих роботах наводиться принципи роботи ДФЗ ВЧ та НВЧЗ, мета та сфера застосування цих захистів. Також глибоко розглядається принцип роботи захистів на електромеханічній базі, яка в даний час є застарілою. Основною особливістю є опис застосування цих захистів для ліній високої напруги 110-220 кВ, більш розповсюджених, ніж ліній надвисокої напруги 330-500-750 кВ, для яких виникають складнощі у використанні захистів.

В роботах [12] та [13] розглянуто практичне застосування теоретичних підходів виконання ДФЗ на базі електромеханічних елементів, показані типові схеми та розрахунки уставок захистів. Головним питанням залишається виконання даного захисту на сучасній цифровій базі для ліній НВН.

Рекомендації по вибору уставок та Вказівки до застосування мікропроцесорного пристрою L60 фірми General Electric наведені у роботах

[14] та [15]. Важливим питанням є експериментальне випробування зазначених рішень за допомогою моделювання для реальних мереж НВН.

У навчальному посібнику Бессонова Л.А. «Теоретичні основи електротехніки» (Bessonov. L.A. Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki : Izd. 9-e, pererab. i dop. M. : Vysshaya shkola, 1996. 638 s.) розглядаються характеристики ліній з розподіленими параметрами, знаходження параметрів цих ліній через розв'язки диференційних рівнянь. Лінії з розподіленими параметрами можна прирівняти до ліній НВН за рахунок їх довжини, конструкції та напруги. Описані методи знаходження струмів та напруг на початку і в кінці «довгих ліній» за допомогою диференційних рівнянь відіграють важливу роль для аналізу перехідних режимів та знаходження уставок струмів спрацьовування захистів ліній надвисокої напруги.

Такі видатні науковці, як Левіуш О.І. та Доні М.А у своїх роботах [16], [17] та [18] зазначають про наявність проблем та особливості виконання ДФЗ для ліній 330-750 кВ. Автори підкреслюють важливість виконання компенсації ємнісних струмів для ліній надвисокої напруги довжиною більше 200 км, а також складнощі у виконанні цих рішень на цифровій базі.

У статтях [19] та [20] розглядається аналіз параметрів елементів енергосистеми та моделювання ділянки високовольтної мережі за допомогою середовища Matlab&Simulink. У статті [20] показано моделювання окремого елемента енергосистеми (силового автотрансформатора 750 кВ) та аналізу перехідних процесів при КЗ для вдосконалення диференційного захисту. Ці роботи показують важливість та ефективність застосування моделювання елементів енергомережі для вдосконалення алгоритму роботи релейного захисту.

3. Матеріали і методи

Диференційний струмовий захист – це захист, що оснований на принципі безпосереднього порівняння струмів з різних кінців об'єкту захисту. Даний захист не реагує на зовнішні КЗ та може діяти без витримки часу, тобто працює з абсолютною селективністю.

На диференційному принципі здійснюються поздовжні та поперечні диференційні захисти. У поздовжніх захистах порівнюються струми двох сторін ділянки захисту. Для можливості порівняння струмів використовуються канали зв'язку у вигляді допоміжних дротів, височастотні або радіо канали.

Поперечний захист оснований на порівнянні струмів однойменних фаз паралельних ланцюгів з подібними параметрами. Поперечний захист має істотний недолік, а саме мертву зону у кінці зони захисту, тому далі розглядається виключно поздовжній захист.

Поздовжні диференційні захисти є двох типів, а саме: прямого порівняння струмів – із застосуванням допоміжних проводів (малі відстані, до 100 км), та непрямого порівняння – із застосуванням високочастотних каналів передачі сигналів (великі відстані, понад 100 км).

Основними перевагами поздовжнього захисту ліній є: абсолютна селективність, швидкодія, нечутливість до хитань та асинхронного ходу в мережі, відносно простий у виконанні та надійний. Головним недоліком цього захисту є канали зв'язку, пошкодження яких призводить до виходу захисту з роботи або його неселективної дії. Вартість захисту переважно залежить від вартості допоміжних дротів або ВЧ каналу.

В сучасних мережах для повітряних ліній напругою 110-330-750 кВ великої довжини у якості основного захисту використовуються ВЧ захисти, а саме ДФЗ. Даний захист оснований на безпосередньому порівнянні фаз струмів з різних кінців лінії, що захищається. Зв'язок між кінцями лінії забезпечується струмами високої частоти (зазвичай 50-300 кГц), які передаються по проводах цієї ж лінії. Струми високої частоти генеруються і обробляються за допомогою спеціальних прийомо-передавачів. Для передачі ВЧ сигналів проводами лінії електропередачі на кінцях ділянки, встановлюються загороджувачі, конденсатори, фільтри приєднання та високочастотні кабелі. Даний тип захисту вимагає лише один ВЧ канал, що є його перевагою.

В мережах для захисту повітряних ліній напругою 330-750 кВ великої довжини застосовується також НВЧЗ.

Можна відмітити основні особливості принципів роботи цих захистів:

- диференційно-фазні струмові захисти основані на принципі безпосереднього порівняння фаз струмів на кінцях ділянки захисту;
- направлені ВЧ захисти основані на принципі непрямого порівняння знаків потужності на кінцях ділянки захисту.

Аналіз захистів ДЗФ та НВЧЗ

ДФЗ. Принцип дії ДФЗ заснований на порівнянні фаз струмів на кінцях лінії непрямим шляхом, а саме за рахунок струмів високої частоти.

За принципом дії ДФЗ не реагує на навантаження та качання в лінії, так як в цих режимах струми на обох кінцях лінії протилежні.

Основні елементи ДФЗ:

- пусковий орган, який пускає генератор високої частоти (ГВЧ) та дозволяє діяти захисту при КЗ;
- орган маніпуляції, який керує ГВЧ в залежності від напрямку струму;
- орган порівняння фаз струмів, який діє на вимкнення при збігу фаз струмів на обох кінцях лінії.

Основні переваги даного захисту, це:

- висока швидкодія, чутливість та селективність роботи;
- неспрацьовування при качаннях та неповнофазних режимах.

Недоліки:

- високі вимоги до високочастотного каналу передачі даних для довгих ліній надвисокої напруги;
- складність виконання.

НВЧЗ. Принцип дії НВЧЗ заснований на блокуванні роботи захисту при зовнішньому КЗ за рахунок контролю напрямку потужності. Основні елементи захисту: пусковий орган, орган направлення потужності і реле блокування (реле спрацювання або неспрацювання захисту).

Основні переваги даного захисту:

- висока швидкодія, чутливість та селективність роботи;
- менші вимоги до високочастотного каналу передачі даних для довгих ліній надвисокої напруги.

Недоліком даного захисту є:

- можливість спрацювання захисту при качаннях та неповно фазних режимах автоматичного вмикання резерву (ОАПВ);
- складність виконання.

Переваги ДФЗ. В неповнофазних режимах (режим ОАПВ) та качаннях ДЗФ працює більш надійно на відміну від НВЧЗ.

Переваги НВЧЗ. Більша швидкодія НВЧЗ, ніж ДФЗ для ліній надвисокої напруги. НВЧЗ у повнофазному режимі при використанні реле напрямку потужності зворотної послідовності (РНПЗП). З 3-х фазною схемою порівняння величин спрацювання забезпечується час роботи захисту менше одного періоду промислової частоти (менше 20 мс).

Важливо, що завадостійкість направленої захисту на спрацювання (по ВЧ каналу) за принципом дії виявляється значно вище, ніж у ДФЗ, оскільки ДФЗ спрацьовує під час паузи між ВЧ пакетами прийомо-передавачів. При КЗ в зоні захисту у направленої захисту обидва передатчика не надсилають сигнали ВЧ блокування і умова його спрацювання виходить краще, ніж

у ДФЗ. Вказане особливо важливо для ліній НВН великої протяжності, де виникають труднощі із забезпеченням необхідних запасів перекривання затухання ВЧ каналу.

Також, при зовнішньому КЗ для блокування направленої захисту висувається менше умов (спрацьовування органу напрямку потужності з однієї сторони), ніж ДФЗ, де більш жорсткі умови (до того ж захисти з обох кінців повинні працювати погоджено). Ось чому в панелях захисту ліній типу ПДЕ-2003 використовуються комбінація вказаних захистів, а саме: для симетричного режиму пошкодження – працює НВЧЗ, а для несиметричного режиму (ОАПВ) – працює ДФЗ.

Цифрові пристрої захисту. Із розвитком технологій розглянуті типи захистів з електромеханічної елементної бази переходять до цифрової. Сучасні технології виконання захистів мають багато переваг перед застарілими. З основних це: точність спрацьовування, швидкодія, універсальність функціонування, зменшення габаритів та споживання енергії. Основними недоліками є:

- зниження надійності функціонування за рахунок меншого часу напрацювання на відмову цифрових елементів;
- значна концентрація захисних функцій на одному пристрої, вихід з ладу такого пристрою призводить до втрати усіх захистів;
- ускладнення експлуатації за рахунок більш високої вимоги до кваліфікації персонала.

Наразі в мережі ОЕС України для захисту ліній 330-750 кВ застосовуються наступні поширені типи панелей захисту та автоматики (РЗА) із використанням функції ДФЗ та НВЧЗ:

- електромеханічні (типу ДФЗ-503, ДФЗ-504);
- напівпровідникові (типу ПДЕ-2003, ПДЕ-2004);
- цифрові пристрої (типу L60, Діамант L040).

В наш час продовжується тенденція по заміні всіх застарілих електромеханічних та напівпровідникових пристроїв РЗА, які фізично відпрацювали свій ресурс на цифрові пристрої.

Порівняння ДФЗ на електромеханічній, напівпровідниковій та цифровій елементній базі. Виконання даного захисту на різних елементних базах має свої особливості. Основними відмінностями є виконання основних органів захисту, таких як пускові органи, органи управління та порівняння фаз. Для визначення основних параметрів спрацьовування застосовуються різні фільтри, наприклад симетричних складових, гармонійних складових. Різна елементна база основних органів захисту вносить зміни в алго-

ритм роботи захисту. Це спричиняє складнощі при їхній сумісній роботі, які необхідно вирішувати також.

Реалізація принципів ДФЗ на цифровій базі. В сучасних цифрових пристроях захисту, таких як L60 та Діамант L040 реалізовано принцип роботи ДФЗ. З досвіду експлуатації відомо, що такий алгоритм роботи ДФЗ для цих пристроїв на лініях НВН працює неселективно або з великими часом спрацьовування, що спливає на стійкість енергосистеми.

Алгоритм роботи диференційного захисту, аналогічний тому що реалізовано у панелі типу ПДЕ-2003, яка вже має великий термін успішної експлуатації, на базі цифрових пристроїв не реалізовано. Тому аналіз алгоритму роботи панелі типу ПДЕ-2003 на лініях НВН з його адаптацією на базі цифрових пристроїв захисту є актуальною науковою задачею.

4. Результати дослідження

У розглянутих наукових роботах освітлюються наявності проблем швидкодії та чутливості захистів для ліній НВН великої потужності. Наголошується, що існуючі типові захисти не справляються із викликами сучасності, які пов'язані зі змінами в енергомережах за рахунок впровадження відновлювальних джерел енергії та необхідності передачі великої потужності на далекі відстані. У статтях [1–13] показано нові принципи виконання типових захистів, які є поки що теоретичними або експериментальними моделями. Автори робіт аналізують результати досліджень та показують переваги нових принципів виконання захистів. В основному, ці захисти розглядаються для потужних енергомереж країн із великою територіями, такими як США, Канада, Китай, Колумбія, Франція, Індія, Пакистан. Розглянуті нові принципи для диференційного захисту цих мереж пов'язані із використанням провідного волоконно-оптичного каналу зв'язку або ж супутникового зв'язку. Можна відзначити, що в роботах не робиться акцент на розгляд самого каналу зв'язку передачі сигналів між комплектами захистів на кінцях лінії. Проте принцип виконання захисту прямо залежить від каналу передачі сигналів. Тому для різних країн, які починали впроваджувати захисти своїх енергомереж, дуже важливим є прив'язка до концепцій наявних каналів зв'язку. Це особливо важливо для ліній надвисокої напруги, так як, наприклад, вартість виконання високочастотного каналу і волоконно-оптичного буде суттєво відрізнятися.

В Україні від самого початку впроваджувались високочастотні канали зв'язку і на даний момент вони є набагато дешевшими в порівнянні із волоконно-оптичними. Треба зазначити, що у вітчизняних мережах НВН також є досвід застосування волоконно-оптичного каналу на нових лініях, але там є свої особливості при довжинах ліній більше 150 км. Наразі в енергосистемі України є лінії надвисокої напруги довжиною більше 250-350 км, де використовується ВЧ канал зв'язку. В роботах [14–22] підкреслюються особливості ВЧ захистів та їх проблематика. Тому для НВН мереж України є актуальним розгляд нових підходів виконання цифрових диференційних захистів, які використовують високочастотний канал зв'язку.

Для підвищення точності визначення параметрів спрацьовування захисту необхідне математичне моделювання перехідних процесів мережі та практичне дослідження роботи алгоритму спрацьовування захисту в умовах, наближених до реальних. Тому актуальною є задача створення нового методу визначення параметрів спрацьовування захисту ЛЕП НВН великої протяжності, який враховував би перехідні процеси у всіх необхідних режимах, математичної та експериментальної моделі роботи методу.

Ефективним способом для аналізу перехідних процесів при коротких замиканнях в мережі з даною конфігурацією є побудова математичної моделі ділянки мережі в програмному комплексі. Завдяки новому алгоритму захисту та математичній моделі можна аналізувати та вдосконалювати роботу захисту для різних режимів мережі.

5. Висновки

На основі аналізу науково-технічної літератури підтверджено актуальність проблеми виконання захистів ліній надвисокої напруги на цифровій елементній базі. Зазначено про складнощі застосування диференційного захисту на довгих лініях надвисокої напруги 330-750 кВ із використанням цифрової елементної бази.

Запропоновано нові напрями у вирішенні даної проблеми шляхом вдосконалення алгоритму роботи диференційного захисту ліній для забезпечення стабільності енергосистеми України.

Встановлено, що ефективним способом для вирішення даної задачі є побудова математичної моделі лінії надвисокої напруги та дослідження роботи нового методу захисту таких ліній.

Список бібліографічних посилань

1. Aboshady, F.M., Saber, A., Khera, F., & Zobaab, A. (2023). High frequency directional-based protection scheme for transmission lines emanating from large scale wind farms. *Electric Power Systems Research*, 225 (109904). DOI: 10.1016/j.epsr.2023.109904.
2. Saber, A., Shaaban, M.F., & Zeineldin, H.H. (2022). A new differential protection algorithm for transmission lines connected to large-scale wind farms. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 141 (108220). DOI: 10.1016/j.ijepes.2022.108220.
3. Wang, B., & Wang, Z. (2025). A novel principle of frequency characteristics-based current differential protection for outgoing lines of wind farms. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 167 (110645). DOI:10.1016/j.ijepes.2025.110645.
4. Hou, J., Gao, Q., Fan, Y., Song, G., Wu, X., Yang, W. ... Peng, F. (2025). Improved differential protection for two-terminal weak feed AC system considering negative sequence control coordination strategy. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 164 (110396). DOI: 10.1016/j.ijepes.2024.110396.
5. Shi, Z., Yu, J., & Ding, X. (2022). Research on transient protection based on time-frequency domain features. *2022 IEEE 5th International Conference on Automation, Electronics and Electrical Engineering (AUTEEE)*. Shenyang, China. IEEE. DOI: 10.1109/AUTEEE56487.2022.9994368.
6. Tang, Y., Shu, H., Dai, Y., & Han, Y. (2024). Enhanced pilot protection scheme for half-wavelength transmission line based on the conservation of traveling wave energy. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 161 (110184). DOI: 10.1016/j.ijepes.2024.110184.
7. Moro, A.F.N.C., Ortega, J.S., & Tavares, M.C. (2022). Performance evaluation of power differential protection applied to half-wavelength transmission lines. *Electric Power Systems Research*, 209 (107998). DOI: 10.1016/j.epsr.2022.107998.
8. Garzón, A., Celeita, D., Ramos, G., Petit, M., Le, T.D., Hoyos, J.P., & Bach, A. (2025). Comparative analysis of impedance and time-domain protection in HVAC and HVDC interconnected systems: A case study in Colombia. *Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 11 (100880). DOI: 10.1016/j.prime.2024.100880.
9. Zhou, B., Li, B., He, J., Li, Y., Xie, Z., & Dai, W. (2024). A novel high-sensitivity time-

domain current differential protection scheme for renewable power transmission system. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 160 (110083). DOI: 10.1016/j.ijepes.2024.110083.

10. Zhang, Y., Yu, Y., & Yang, G. (2025). Adaptive current differential protection principle for transmission line connected to energy storage power station based on phase and amplitude compensation. *Journal of Energy Storage*, 111 (115468). DOI: 10.1016/j.est.2025.115468.

11. Jain, R., Velaga, Y.N., Prabakar, K., Baggu, M., & Schneider, K. (2022). Modern trends in power system protection for distribution grid with high DER penetration. *E-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 2 (100080). DOI: 10.1016/j.prime.2022.100080.

12. Ovcharenko, N.I. (2002). Differentsial'no-faznaya vysokochastotnaya zashchita liniy elektroperechachi napryazheniyem 110 – 220 kV DFZ-201. *Energetic*. 12 (48).

13. *Rukovodyashchie ukazaniya po releynoy zashchite: Differentsial'no-faznaya vysokochastotnaya zashchita liniy 110-330 kV*. (1972). 9. M.: Energiya.

14. *Rekomendatsii po vyboru ustavok differentsial'no-faznoy zashchity liniy tipa L60 V.4.8X*. (2005). Kiyev: GE MULTILIN.

15. *Ustroystvo differentsial'no-faznoy zashchity linii L60*. (2013). Rukovodstvo: 1601-0212-X1 (GEK-119605). GE Multilin.

16. Leviush, A. I., Medvedeva, L. N., & Sapir, Y. D. (1973). Printsipy vypolneniya odnoperiodnoi vysokochastotnoi zashchity VL 750 kV. *Elektrichestvo*, 8. 1–9.

17. Doni, N. A., Leviush, A. I., Tonkikh, E. V., & Uzhegov, V. T. (2003). O predel'nykh dlinakh VL, zashchishchaemykh differentsial'no-faznymi zashchitami bez ustroystv kompensatsii yemkostnykh tokov. *Elektricheskiye stantsii – Energoprogres*, 2, 34–36.

18. Doni, N. A., & Leviush, A. I. (2013). Osobennosti mikroprotssessornoi bystrodeistvuyushchei napravlennoi differentsial'no-faznoi zashchity VL 330-750 kV. *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya*, 2, 25–26.

19. Савельєв, А. А. (2022). Розроблення та моделювання інформаційної системи керування параметрами повітряних ліній електропередачі в програмі «Simulink». *Електротехнічні та комп'ютерні системи*, 36 (112), 27–39.

20. Яндульский, О. С., Марченко, А. А., & Заколюдяжний, В. В. (2011). Підвищення ефективності релейного захисту автотрансформаторів 750 кВ із поздовжньо-поперечним регулюванням. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, 6, 138–141.

References

1. Aboshady, F.M., Saber, A., Khera, F., & Zoba, A. (2023). High frequency directional-based protection scheme for transmission lines emanating from large scale wind farms. *Electric Power Systems Research*, 225 (109904). DOI: 10.1016/j.epsr.2023.109904.

2. Saber, A., Shaaban, M.F., & Zeineldin, H.H. (2022). A new differential protection algorithm for transmission lines connected to large-scale wind farms. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 141 (108220). DOI: 10.1016/j.ijepes.2022.108220.

3. Wang, B., & Wang, Z. (2025). A novel principle of frequency characteristics-based current differential protection for outgoing lines of wind farms. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 167 (110645). DOI:10.1016/j.ijepes.2025.110645.

4. Hou, J., Gao, Q., Fan, Y., Song, G., Wu, X., Yang, W. ... Peng, F. (2025). Improved differential protection for two-terminal weak feed AC system considering negative sequence control coordination strategy. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 164 (110396). DOI: 10.1016/j.ijepes.2024.110396.

5. Shi, Z., Yu, J., & Ding, X. (2022). Research on transient protection based on time-frequency domain features. *2022 IEEE 5th International Conference on Automation, Electronics and Electrical Engineering (AUTEEE)*. Shenyang, China. IEEE. DOI: 10.1109/AUTEEE56487.2022.9994368.

6. Tang, Y., Shu, H., Dai, Y., & Han, Y. (2024). Enhanced pilot protection scheme for half-wavelength transmission line based on the conservation of traveling wave energy. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 161 (110184). DOI: 10.1016/j.ijepes.2024.110184.

7. Moro, A.F.N.C., Ortega, J.S., & Tavares, M.C. (2022). Performance evaluation of power differential protection applied to half-wavelength transmission lines. *Electric Power Systems Research*, 209 (107998). DOI: 10.1016/j.epsr.2022.107998.

8. Garzón, A., Celeita, D., Ramos, G., Petit, M., Le, T.D., Hoyos, J.P., & Bach, A. (2025). Comparative analysis of impedance and time-domain protection in HVAC and HVDC interconnected systems: A case study in Colombia. *Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 11 (100880). DOI: 10.1016/j.prime.2024.100880.

9. Zhou, B., Li, B., He, J., Li, Y., Xie, Z., & Dai, W. (2024). A novel high-sensitivity time-domain current differential protection scheme for

renewable power transmission system. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 160 (110083). DOI: 10.1016/j.ijepes.2024.110083.

10. Zhang, Y., Yu, Y., & Yang, G. (2025). Adaptive current differential protection principle for transmission line connected to energy storage power station based on phase and amplitude compensation. *Journal of Energy Storage*, 111 (115468). DOI: 10.1016/j.est.2025.115468.

11. Jain, R., Velaga, Y.N., Prabakar, K., Baggu, M., & Schneider, K. (2022). Modern trends in power system protection for distribution grid with high DER penetration. *E-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 2 (100080). DOI: 10.1016/j.prime.2022.100080.

12. Ovcharenko, N.I. (2002). Differential'no-faznaya vysokochastotnaya zashchita liniy elektropredachi napryazheniyem 110 – 220 kV DFZ-201. *Energetic*. 12 (48).

13. *Rukovodyashchie ukazaniya po releyroy zashchite: Differential'no-faznaya vysokochastotnaya zashchita liniy 110-330 kV*. (1972). 9. M.: Energiya.

14. *Rekomendatsii po vyboru ustavok differential'no-faznoy zashchity liniy tipa L60 V.4.8X*. (2005). Kiyev: GE MULTILIN.

15. *Ustroystvo differential'no-faznoy zashchity linii L60*. (2013). Rukovodstvo: 1601-0212-X1 (GEK-119605). GE Multilin.

16. Leviush, A. I., Medvedeva, L. N., & Sapir, Y. D. (1973). Printsipy vypolneniya odnoperiodnoi vysokochastotnoi zashchity VL 750 kV. *Elektrichestvo*, 8. 1–9.

17. Doni, N. A., Leviush, A. I., Tonkikh, E. V., & Uzhegov, V. T. (2003). O predel'nykh dlinakh VL, zashchishchaemykh differentsial'no-faznymi zashchitami bez ustroystv kompensatsii yemkostnykh tokov. *Elektricheskiye stantsii – Energoprogress*, 2, 34–36.

18. Doni, N. A., & Leviush, A. I. (2013). Osobennosti mikroprotsessornoj bystrodeistvuyushchei napravlennoy differentsial'no-faznoy zashchity VL 330-750 kV. *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya*, 2, 25–26.

19. Savieliev, A. A. (2022). Development and modeling of an information system for controlling parameters of overhead power lines in the program "Simulink". *Electrotechnic and Computer Systems*, 36 (112), 27–39.

20. Yandulskyi, O. S., Marchenko, A. A., & Zakolodiazhnyi, V. V. (2011). Increase of efficiency of relay protection of autotransformers 750 kV with the longitudinally-transversal adjusting. *Visnyk of Vinnytsia Polytechnical Institute*, 6, 138–141.

Analysis of the Features of Implementing Differential Protections of Extra High Voltage Power Transmission Lines

Andrii Topor, Mykhailo Shabovta
Odesa Polytechnic National University

Abstract. Nowadays, there is a need for constant analysis of the operation of relay protection and improvement of the principles of its implementation, due to the fact that microprocessor technologies are rapidly developing and being implemented in relay protection. The purpose of the research is to develop directions for improving protection and ensuring the correct operation of differential-phase protection of 750 kV lines based on microprocessor devices. Therefore, the objectives of this study are an in-depth analysis of the principle of operation of this protection and determining directions for solving the problem. The scientific value is to actualize the problem for improving the algorithm of operation of differential-phase high-frequency protection of extra-high voltage lines. The practical significance of the research lies in increasing the efficiency of relay protection of the country's power system. There is used the method of analysis of the available scientific and technical literature to identify the problem in this paper. There are considered both existing protections and the principles of their operation, as well as new theoretical and experimental models of protections that have not yet been implemented. The characteristics of protections and the features of the scope of application are analyzed. Difficulties were identified in implementing the differential phase protection algorithm in microprocessor terminals specifically for long extra-high voltage lines of 330-750 kV. Lines of this voltage have a large capacitive component, which leads to the appearance of complex transients. These processes affect both the value of the measured parameters and the quality of the signal transmitted over the high-frequency channel. All this affects the selectivity of operation and increases the time of protection operation, thereby reducing the stability of the power system. The result of the research is confir-

mation of the relevance of the problem and the determination that an effective way to solve this problem is to build a mathematical model of the research object for further in-depth consideration. There was established that the problem of implementing microprocessor protection of extra-high voltage lines is not solved based on the analysis of scientific and technical literature. New directions in solving this problem are proposed by improving the algorithm of protection to ensure the stability of the unified power system of Ukraine. There is established that an effective way to solve this problem is to build a mathematical model of a specific extra-high voltage line of Ukraine and study the operation of a new method of protecting such lines.

Keywords: relay protection, differential protection, differential-phase protection, high-frequency protection, extra-high voltage line, transients, short circuits, modeling, power system.

Отримано 03.07.2025



Топор Андрій Костянтинівич, аспірант кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту, Національний університет «Одеська політехніка»; проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна. E-mail: topor_ak@stud.op.edu.ua; тел. +38 066 947 8985

Andrii Topor, PhD Student of the Department of Power Supply and Energy Management, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Avenue, Odesa, 65044, Ukraine. E-mail: topor_ak@stud.op.edu.ua; ph.: +38 066 947 8985

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-9862-3867>



Шабовта Михайло Юрійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту, Національний університет «Одеська політехніка»; проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна.

E-mail: shabovta@opu.ua; тел. +38 099 641 7990

Mykhailo Shabovta, PhD, Assistant professor of the Department of Power Supply and Energy Management, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Avenue, Odesa, 65044, Ukraine. E-mail shabovta@opu.ua, ph.: +38 099 641 7990

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1950-2161>

Однозонний тяговий електропривод міського легкового транспортного засобу

В. А. Войтенко, В. А. Водічев, О. Г. Калінін, В. О. Гладченко

Національний університет «Одеська політехніка»

Анотація. Проведено аналіз технічних параметрів трансмісії легкового автомобіля з двигуном внутрішнього згорання, який має бути перероблений на міський електромобіль. Сформульовано вимоги до технічних параметрів міського електромобіля. Визначено залежність сили опору руху електромобіля від швидкості руху електромобіля по горизонтальній дорозі, розраховано залежність значення потужності механічної енергії, яку мають розвивати приводні колеса електромобіля, від швидкості руху електромобіля, визначено залежність кількості механічної енергії, яку витрачають приводні колеса електромобіля від швидкості руху електромобіля по горизонтальній дорозі на відстань 100 км. Вибрано тяговий асинхронний електричний двигун і перетворювач частоти до нього. Розраховано основні параметри бортового джерела електричної енергії електромобіля. Проведено синтез параметрів тягового електропривода електромобіля. Розроблено математичну модель однозонного тягового електропривода електромобіля. На математичній моделі проведено дослідження електромеханічних перехідних процесів, які відбуваються в однозонному тяговому електроприводі електромобіля при розгоні і при гальмуванні електромобіля.

Ключові слова: електромобіль, асинхронний електричний двигун, електропривод, акумуляторна батарея, електрична енергія, математична модель, перехідні процеси.

Вступ

В Україні і в усьому світі популярність електромобілів постійно зростає. Це обумовлено тим, що вартість пального для двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ) постійно зростає і на сьогодні значно перевищує вартість електричної енергії. Тому деякі володарі автомобілів з ДВЗ замислюються над переробкою їх автомобілів на електромобіль, призначений для пересування на невелику відстань [1]–[4]. Проте, до основних проблем, які перешкоджають розповсюдженню електромобілів в Україні можна віднести як велику вартість нових електромобілів, так і велику вартість переробки старих автомобілів з ДВЗ на електромобілі. Одним з можливих способів зменшення вартості нових електромобілів є паралельний серійний випуск електромобілів, побудованих на базі автомобілів з ДВЗ, які вже випускаються серійно [5]. При проведенні переобладнання автомобіля з ДВЗ на електромобіль бажано максимально спростити технологію і зменшити витрати коштів. Тому бажано при побудові електромобіля

використовувати якомога більше елементів і вузлів механічної трансмісії автомобіля з ДВЗ. Найбільш дешевий варіант проектування і виготовлення електромобіля полягає в заміні ДВЗ на електричний двигун і в встановленні перетворювача електричної енергії і акумуляторної батареї (АБ) замість бензобаку. АБ має накопичувати кількість електричної енергії, необхідну для пересування електромобіля на задану відстань. Треба звернути увагу на те, що АБ відноситься до найбільш коштовних і найменш довговічних елементів електромеханічної трансмісії електромобіля. Вага і вартість АБ суттєво залежить від кількості енергії, яка може бути накопичена в АБ. Для зменшення вартості електромобіля бажано використовувати АБ якомога меншої ємності. Тому найбільш дешевим електромобілем може бути електромобіль, призначений для пересування в місті на невелику відстань (від 50 км до 100 км).

Електромобіль буде більш дешевим, якщо на нього встановити найбільш дешевий, але надійний тяговий двигун. До найбільш дешевих, легких і надійних двигунів належать асинхронні двигуни (АД) з короткозамкненою обмоткою ротора. Тому з метою зменшення вартості електромобіля і підвищення його надійності

© Войтенко В. А., Водічев В. А.,
Калінін О. Г., Гладченко В. О., 2025

бажано в електромобілях застосовувати тягові АД. Для зменшення вартості електромобіля треба використовувати прості і дешеві перетворювачі частоти (ПЧ), які серійно випускає промисловість.

Таким чином можна стверджувати, що проблема переобладнання транспортних засобів з ДВЗ на електричні транспортні засоби (ЕТЗ) з мінімальною зміною конструкції базового автомобіля з ДВЗ є актуальною.

3. Мета дослідження

Метою даної роботи є розробка однозонного тягового електропривода змінного струму, призначеного для дешевого міського легкового електромобіля, та аналіз електромеханічних процесів, які відбуваються в електромеханічній системі електромобіля під час його руху.

4. Матеріали та результати дослідження

Для переробки автомобіля з ДВЗ на електромобіль було обрано автомобіль ЗАЗ-968М, основні технічні параметри якого приведено в табл. 1 [6]–[8]. На підставі технічних параметрів автомобіля ЗАЗ-968М можна сформулювати вимоги до технічних параметрів електромобіля, побудованого на його базі. Основним принципом при визначенні вимог до технічних параметрів електромобіля є те, що його параметри мають бути не гіршими за параметри автомобіля ЗАЗ-968М. При визначенні вимог до технічних параметрів електромобіля бажано враховувати вимоги законодавства України. Треба звернути увагу на те, що з 1.11.24 в містах України максимальна швидкість пересування ТЗ обмежена на рівні 50 км/год [9]–[10]. Тому з врахуванням припустимого перевищення швидкості (+20 км/год) максимальна швидкість пересування міського електромобіля може бути не більшою 70 км/год.

Для зменшення вартості переробки автомобіля на електромобіль було використано 4-швидкісну коробку перемикачів передач (КПП) автомобіля ЗАЗ-968М. В більшості випадків достатньо користуватись 1-ю і 4-ю передачами КПП. Перша передача КПП має забезпечити електромобілю велику силу тяги, потрібну для долаття підйомів дороги (до 36%). Четверта передача КПП має забезпечити достатньо велику максимальну швидкість руху електромобіля по горизонтальній дорозі (60-80 км/год.). Але застосування інших передач КПП дозволяє покращити динамічні властивості ЕТЗ, тобто, збільшити силу тяги (прискорення) приводних коліс електромобіля і, завдяки цьому,

зменшити час розгону і гальмування електромобіля до потрібного значення швидкості руху. Це важливо для більш динамічного пересування електромобіля в місті. До того ж максимальне використання елементів конструкції автомобіля ЗАЗ-968М при розробці електромобіля дозволяє значно зменшити вартість переробки автомобіля на електромобіль. Окрім того, важливо адаптувати органи керування електромобілем так, щоб користуватись ними було звично водію звичайного автомобіля ЗАЗ-968М [11].

Таблиця 1
Основні технічні параметри автомобіля
ЗАЗ-968М (джерело: [6])

Найменування параметра	Значення
Коефіцієнт опору повітря	0,43 Нс ² /м/кг
Повна маса автомобіля	1200кг
Корисне навантаження автомобіля	450кг
Максимальна швидкість руху	120 км/год
Час розгону від 0 до 100 км/год з водієм та з одним пасажиром	32,0 с
Максимальний підйом, який може подолати автомобіль	36% (20°)
Номінальна потужність ДВЗ / при частоті обертання валу ДВЗ	30,8 кВт / при 4400 об/хв
Максимальний оберта-ючий момент ДВЗ / при частоті обертання валу ДВЗ	74,5 Н·м / при 3000 об/хв
Коробка перемикачів передач	4-швидкісна механічна
Передаточні числа на відповідних передачах:	1-перша – 3,800 2-друга – 2,120 3-третя – 1,409 4-четверта – 0,964 Задня – 4,156
Передаточне число головної передачі	4,125
Розмір радіальних шин	155/70 R13

Будемо вважати, що габаритні розміри електромобіля і максимальна повна маса електромобіля дорівнюють габаритним розмірам і повній масі автомобіля ЗАЗ-968М. Тому значення сили опору руху електромобіля визначаємо для габаритних розмірів і повної масі автомобіля ЗАЗ-968М [9], [10], [12].

В табл. 2 неведені результати розрахунку сил опору повітря ($F_{оп.пов}$) [12] і сумарної сили опору руху ($F_{\Sigma оп}$) електромобіля по горизонтальній дорозі з заданою швидкістю (V).

В табл. 2 також неведено результати розрахунку залежності значення потужності механічної енергії (P_K), яку мають розвивати приводні колеса електромобіля, від швидкості

руху електромобіля (V) по горизонтальній дорозі, а також результати розрахунку залежності значення кількості енергії (A_K), яку будуть витратити приводні колеса електромобіля, при русі електромобіля по горизонтальній дорозі з заданою швидкістю на відстань 100 км [9].

Таблиця 2

Результати розрахунку сили опору руху, потужності і кількості енергії, яку мають розвивати і витратити приводні колеса при русі електромобіля по горизонтальній дорозі з потрібною швидкістю

V , км/год.	V , м/с	$F_{оп.пов}$, Н	$F_{\Sigma оп}$, Н	P_K , Вт	A_K , МДж
0,36	0.1	0,0051	211,9051	21,19	21,191
10	2.78	3,94	215,84	600,04	21,584
20	5.56	15,78	227,68	1265,90	22,768
30	8.33	35,41	247,31	2060,09	24,731
40	11.11	62,99	274,89	3054,03	27,489
50	13.89	98,46	310,36	4310,90	31,036
60	16.67	141,81	353,71	5896,35	35,371
70	19.44	192,86	404,76	7868,53	40,476
80	22.22	251,96	463,50	10299,00	46,350
90	25,00	318,95	530,85	13271,25	53,085
100	27,78	393,78	605,68	16825,79	60,568

Будемо вважати, що при русі електромобіля вгору по дорозі з укладом 36% швидкість руху буде достатньо малою, тому силу опору повітря враховувати не будемо [9]–[10]. Сумарну силу опору руху повного електромобіля вгору по дорозі з укладом 36% ($F_{\Sigma,36\%}$) визначаємо за формулою (1):

$$F_{\Sigma,36\%} = F_{кот.36\%} + F_{укл.36\%} \quad (1)$$

$$F_{\Sigma,36\%} = 199,12 + 4026,26 = 4225,38 \text{ Н.}$$

де $F_{кот.36\%}$ – сила опору котіння коліс електромобіля по дорозі з укладом 36%;

$F_{укл.36\%}$ – сила опору руху електромобіля від укладу дороги.

Функціональну схему електромеханічної трансмісії електромобіля показано на рис. 1. Цифрами позначено наступні елементи і вузли трансмісії електромобіля: 1 – бортове джерело електричної енергії; 2 – перетворювач частоти (ПЧ); 3 – тяговий електродвигун; 4 – коробка перемикання передач (КПП); 5 – головна передача з диференціалом (ГП); 6 – півосі приводних коліс; 7 – приводні колеса.

Статичний радіус шини електромобіля визначено на підставі параметрів шини автомобіля ЗАЗ-968М [6]–[8], які наведено в табл. 1:

$$R_{CT} = 0,257 \text{ м.} \quad (2)$$

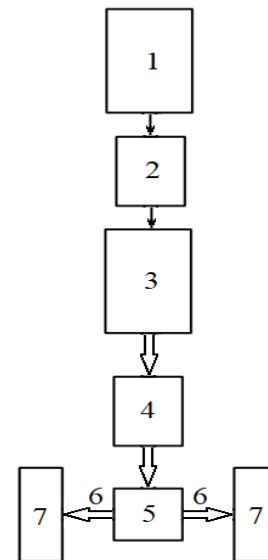


Рисунок 1 – Функціональна схема трансмісії електромобіля

На підставі значень передавальних чисел КПП і передавального числа головної передачі (ГП), наведених в табл. 1, були розраховані передавальні числа трансмісії електромобіля на всіх передачах КПП за формулою (3):

$$i_{\text{транс.}i} = i_{\text{КПП},i} i_{\text{ГП}}, \quad (3)$$

де $i_{\text{КПП},i}$ – передавальне число на i -й передачі КПП, від.од.;

$i_{\text{ГП}}$ – передавальне число ГП, від.од..

Результати розрахунку передавальних чисел трансмісії електромобіля на всіх передачах КПП наведено в табл. 3.

Таблиця 3
Передавальні числа трансмісії електромобіля на всіх передачах КПП

Номер передачі КПП	Передавальні числа трансмісії, $i_{\text{ТРАНС.і}}$
1-перша	15,675
2-друга	8,745
3-третя	5,812
4-четверта	3,977
Задній хід	17,144

На підставі статичного радіусу шини електромобіля (2) і передавальних чисел трансмісії електромобіля (табл.3) визначимо кутову швидкість з якою має обертатися вал тягового двигуна на 4-й передачі КПП, якщо максимальна швидкість руху електромобіля дорівнює 70 км/год (19,44 м/с) за формулою (4):

$$\omega_{\text{АД.4.70}} = \frac{V_{\text{ЕТЗ.70}} \cdot i_{\text{ТРАНС.4}}}{R_{\text{СТ}}} \quad (4)$$

$$\omega_{\text{АД.4.70}} = \frac{19,44 \times 3,977}{0,257} = 300,83 \text{ рад/с.}$$

де $V_{\text{ЕТЗ.70}} = 19,44$ м/с – максимальна лінійна швидкість руху електромобіля (70 км/год);

$i_{\text{ТРАНС.4}} = 3,977$ – передавальне число електромеханічної трансмісії електромобіля на 4-й передачі КПП (табл. 3).

Таким чином, для того, щоб електромобіль рухався з максимальною швидкістю (70 км/год) на найвищій 4-й передачі КПП необхідно, щоб вал тягового двигуна обертася з кутовою швидкістю 300,83 рад/с (2872,7 об/хв.). Це треба врахувати при виборі тягового АД для однозонної системи регулювання швидкості.

На підставі результатів розрахунку потужності механічної енергії, яку мають розвивати приводні колеса електромобіля (табл. 2), треба визначити потужність, яку має розвивати тяговий двигун при русі електромобіля по горизонтальній дорозі на швидкості 19,44 м/с (70 км/год). Таким чином, номінальна потужність тягового двигуна має відповідати умові (5): номінальна потужність тягового двигуна має відповідати умові (5):

$$P_{\text{АД.Н}} \geq \frac{P_{\text{АД.70.Н}}}{\eta_{\text{ТРАНС}}} \quad (5)$$

$$P_{\text{АД.Н}} = \frac{7868,53}{0,85} = 9257,1 \text{ Вт.}$$

де $P_{\text{АД.70.Н}} = 7868,53$ Вт – потужність механічної енергії, яку розвивають приводні колеса електромобіля при русі ЕТЗ по горизонтальній дорозі з лінійною швидкістю 70 км/год;

$\eta_{\text{ТРАНС}} = 0,85$ – ККД механічної трансмісії електромобіля.

Таким чином, для того, щоб електромобіль рухався з максимальною лінійною швидкістю 70 км/год. на найвищій (4-й) передачі КПП необхідно, мати тяговий АД, номінальна потужність якого має бути не менше 9257,1 Вт, а номінальна кутова швидкість вала тягового двигуна має бути не менше 300,83 рад/с (2872,7 об/хв.). В зв'язку з цим було обрано тяговий асинхронний двигун типу 4А132М2У3 основного виконання зі ступенем захисту IP44 [13] номінальною потужністю 11 кВт і з номінальним значенням синхронної кутової швидкості обертання валу 314,16 рад/с (3000 об/хв.). Маса АД типу 4А132М2У3 дорівнює 93 кг.

Запишемо рівняння зв'язку (6) між значенням лінійної швидкості руху електромобіля ($V_{\text{ЕТЗ.і}}$) і номінальним значенням кутової швидкості обертання валу тягового двигуна:

$$V_{\text{ЕТЗ.і}} = \frac{\omega_{\text{АД.Н.0}} \cdot (1 - s_{\text{Н}})}{i_{\text{ТРАНС.і}}} R_{\text{СТ}} \quad (6)$$

де $\omega_{\text{АД.Н.0}} = 314,16$ рад/с – номінальне значення синхронної кутової швидкості обертання валу тягового двигуна типу 4А132М2У3;

$s_{\text{Н}} = 0,023$ – номінальне ковзання валу тягового АД типу 4А132М2У3;

$i_{\text{ТРАНС.і}}$ – передавальне число механічної трансмісії електромобіля на і-й передачі КПП (табл. 3).

За формулою (6) було розраховано значення лінійної швидкості руху електромобіля на усіх передачах КПП при номінальному значенні кутової швидкості обертання валу тягового двигуна з врахуванням радіусу приводних коліс та передавальних чисел трансмісії електромобіля на відповідних передачах КПП (табл. 3). Результати розрахунку наведені в табл. 4.

За формулою (7) було визначено номінальний рушійний момент тягового АД типу 4А132М2У3:

$$M_{\text{АД.Н}} = \frac{P_{2\text{Н}}}{\omega_{\text{АД.Н.0}} \cdot (1 - s_{\text{Н}})} \quad (7)$$

$$M_{\text{АД,Н}} = \frac{11000}{314,16 \cdot (1-0,023)} = 35,84 \text{ Нм.}$$

де $P_{2H} = 11000 \text{ Вт}$ – номінальне значення механічної потужності тягового двигуна типу 4A132M2Y3.

За допомогою рівняння (8) було визначено силу тяги, яку будуть розвивати приводні колеса електромобіля на кожній передачі КПП ($F_{\text{ЕТЗ,Н,і}}$), якщо вал тягового АД буде розвивати номінальний момент ($M_{\text{АД,Н}} = 35,84 \text{ Нм}$):

$$F_{\text{ЕТЗ,Н,і}} = \eta_{\text{ТРАНС}} \cdot i_{\text{ТРАНС,і}} \frac{M_{\text{АД,Н}}}{R_{\text{СТ}}}, \quad (8)$$

Результати розрахунку наведені в табл. 4.

Таблиця 4

Результати розрахунку швидкості руху електромобіля і сили тяги, яку розвивають приводні колеса електромобіля на різних передачах КПП при номінальному значенні кутової швидкості обертання валу тягового АД і номінальному значенні моменту, який розвиває тяговий АД

Номер передачі КПП	$V_{\text{ЕТЗ}}$, м/с	$V_{\text{ЕТЗ}}$, км/год.	$F_{\text{ЕТЗ,Н,і}}$, Н
1-перша	5,032	18,12	1858,1
2-друга	9,020	32,47	1036,6
3-третя	13,572	48,86	688,9
4-четверта	19,835	71,40	471,4
Задній хід	4,601	16,56	2032,2

Порівняємо результати розрахунку значення сили опору руху електромобіля вгору по дорозі з уклоном 36%, яке було розраховано за формулою (1), і значення сили тяги електромобіля на 1-й передачі КПП при номінальному значенні рушійного моменту тягового двигуна (табл. 4). За формулою (9) визначимо кратність перенавантаження тягового двигуна по моменту при русі повного електромобіля вгору по дорозі з уклоном 36% на першій передачі КПП з малою швидкістю:

$$\lambda_1 = \frac{F_{\Sigma 36\%}}{F_{\text{ЕТЗ,Н,1}}}, \quad (9)$$

$$\lambda_1 = \frac{4225,38}{1858,1} = 2,27.$$

де $F_{\Sigma 36\%}$ – сумарна сила опору руху повного електромобіля вгору по дорозі з уклоном 36%;

$F_{\text{ЕТЗ,Н,1}}$ – сила тяги, яку розвивають приводні

колеса електромобіля на 1-й передачі КПП при номінальному значенні моменту тягового АД типу 4A132M2Y3 (табл.4).

Відповідно до параметрів асинхронного двигуна типу 4A132M2Y3 [13] його перенавантажувальна здатність за моментом дорівнює:

$$\frac{M_{\text{К}}}{M_{\text{АД,Н}}} = 2,8. \quad (10)$$

де $M_{\text{К}}$ – критичний момент асинхронного двигуна типу 4A132M2Y3;

$M_{\text{АД,Н}}$ – номінальний момент асинхронного двигуна типу 4A132M2Y3.

Таким чином на підставі рівнянь (9) і (10) видно, що асинхронний двигун типу 4A132M2Y3 може розвинути достатньо великий рушійний момент, щоб забезпечити рух електромобіля вгору по дорозі з уклоном 36% на першій передачі.

Окрім того можна використовувати передачу заднього ходу як додаткову понижену передачу КПП. Для цього достатньо включити за допомогою КПП передачу заднього ходу і змінити напрям обертання валу АД за допомогою ПЧ.

Для запобігання перенавантаження перетворювача частоти (ПЧ) важливо, щоб при русі електромобіля на першій передачі КПП вгору по дорозі з уклоном 36% тяговий АД не споживав від ПЧ занадто велике значення струму. Тому номінальне значення струму обраного ПЧ має бути більшим значення струму, який АД споживає від ПЧ при русі електромобіля на першій передачі КПП вгору по дорозі з уклоном 36%. Відповідно було обрано перетворювач частоти типу DV6-340-22К з номінальним значенням вихідного струму 48 А [14]. Маса ПЧ типу DV6-340-22К дорівнює 12 кг.

З табл. 4 видно, що при номінальному значенні кутової швидкості валу тягового двигуна (306,9 рад/с) електромобіль на 4-й передачі може рухатись на швидкості 71,40 км/год. З табл. 4 також видно, що при номінальному значенні рушійного моменту тягового двигуна (35,8 Нм) приводні колеса електромобіля на 4-й передачі КПП розвивають силу тяги, яка дорівнює 471,4 Н. З табл. 2 видно, що при русі електромобіля по горизонтальній дорозі зі швидкістю 70 км/год сила опору руху електромобіля ($F_{\Sigma \text{оп}}$) дорівнює 404,76 Н, а при русі електромобіля зі швидкістю 80 км/год сила опору руху електромобіля дорівнює 463,50 Н. Тому можна стверджувати, що при тривалому русі електромобіля по горизонтальній дорозі зі

швидкістю до 80 км/год тяговий АД буде розвивати момент, який не перевищує номінального значення, і тому температура тягового АД також не буде перевищувати номінального значення. Також можна зробити висновок про те, що при частотному регулюванні швидкості АД електромобіль короточасно може рухатись зі швидкістю, яка перевищує 80 км/год, але для цього на обмотку статора треба подавати напругу змінного струму, частота якої буде перевищувати номінальне значення частоти (50 Гц). Кратність максимального крутного моменту тягового двигуна типу 4A132M2У3 дорівнює 2,8. Тому впродовж короткого часу електромобіль здатен долати дорогу з уклоном 36%.

На підставі параметрів АД типу 4A132M2У3 [13] було визначено параметри тягової АБ [15]. Номінальне значення напруги тягової літій-йонної АБ електромобіля дорівнює 592 В [16]. На підставі результатів розрахунків, наведених в таблиці 2 було визначено, що ємність АБ, яка є достатньою для пересування електромобіля на відстань 100 км зі швидкістю 80 км/год, має дорівнювати 30 А×год. Таким чином, розроблена АБ може накопичувати 17,76 кВт×год (64 МДж) електричної енергії. Маса АБ дорівнює 130 кг.

На підставі того обмеження, що повна маса електромобіля не може бути більшою за повну масу автомобіля з ДВЗ (1200 кг) було визначено, що в порівнянні з автомобілем з ДВЗ корисне навантаження електромобіля зменшиться від 450кг до 360кг.

Для синтезу параметрів регулятора швидкості АД треба знати значення сумарного моменту інерції електропривода, приведеного до валу тягового АД. Результати розрахунку значення сумарного моменту інерції електропривода, приведеного до валу тягового АД, для повного електромобіля, який рухається на 1-й, 2-й, 3-й, 4-й передачі КПП і на передачі заднього ходу, приведені в табл. 5.

Таблиця 5
Результати розрахунку значення приведеного до валу тягового двигуна сумарного моменту інерції для повного електромобіля.

Номер передачі КПП	Передавальні числа трансмісії, $i_{\text{ТРАНС}}$	$J_{\Sigma ETZ, i}$, кг·м ²
1-перша	15,675	0,3686
2-друга	8,745	1,082
3-третя	5,812	2,392
4-четверта	3,977	5,057
Задній хід	17,144	0,3157

Оскільки приведенне до валу двигуна значення сумарного моменту інерції тягового електропривода змінюється у 16 разів, то синтез параметрів регулятора швидкості електромобіля було виконано для максимального значення сумарного моменту інерції електропривода:

$$J_{\Sigma ETZ, MAX.} = 5,057 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (11)$$

Але треба сказати, що насправді функцію регулятора швидкості виконує водій, який знає задане значення швидкості, з якою має рухатись електромобіль, оцінює значення реальної швидкості руху електромобіля і формує сигнал завдання швидкості електромобіля натискаючи на педаль газу. Сигнал від педалі газу подається на вхід ПЧ і змінює частоту напруги на обмотці статора АД.

Моделювання системи регулювання швидкості електромобіля виконано у пакеті Matlab Simulink [17].

На рис. 3 показано часові діаграми перехідних процесів по швидкості електромобіля і по силі тяги, яку розвивають приводні колеса електромобіля, при розгоні до максимальної швидкості (73,09 км/год.), з перемиканням КПП від 1-ї передачі до 4-ї передачі, й при гальмуванні електромобіля з перемиканням КПП від 4-ї передачі до 1-ї передачі.

На часовій діаграмі 2 (рис. 3) видно, що розгін електромобіля до максимальної швидкості (73,09 км/год) з перемиканням передач КПП відбувається за 17,22 секунди.

На рис. 3 також видно, що при розгоні електромобіля на 1-й передачі КПП приводні колеса електромобіля розвивають силу тяги 4652,24 Н (часова діаграма 3), а тяговий двигун розвиває рушійний момент 84,75 Нм (часова діаграма 5). Максимальне значення рушійного моменту обмежено штучно.

При розгоні електромобіля на 2-й передачі КПП приводні колеса електромобіля розвивають силу тяги 2595,46 Н (часова діаграма 3), а рушійний момент тягового двигуна штучно обмежено максимальним значенням 84,75 Нм.

При розгоні електромобіля на 3-й передачі КПП приводні колеса електромобіля розвивають силу тяги 1724,96 Н (часова діаграма 3), а рушійний момент тягового двигуна штучно обмежено на максимальному значенні 84,75 Нм.

При розгоні електромобіля на 4-й передачі КПП приводні колеса електромобіля розвивають силу тяги 1180,35 Н (часова діаграма 3), а тяговий двигун розвиває максимальне значення рушійного моменту 84,75 Нм (часова діаграма 5).

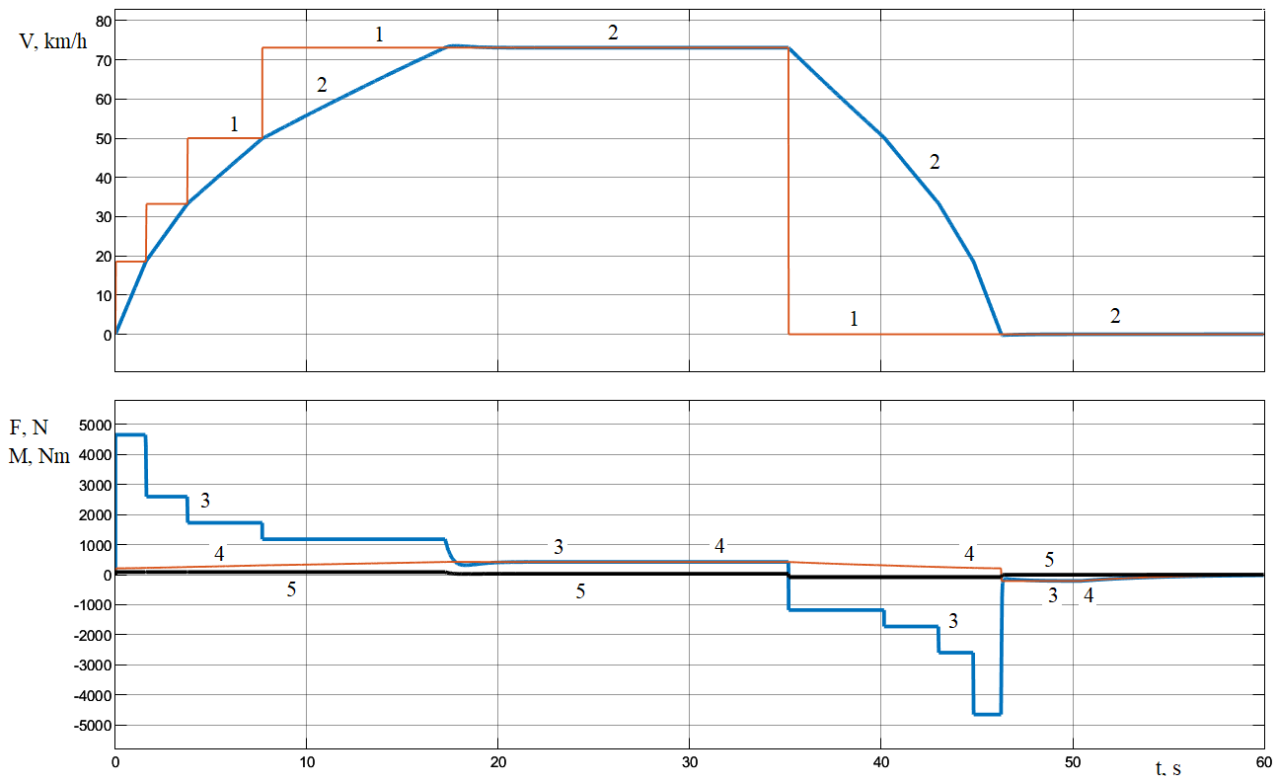


Рисунок 3 – Графіки перехідних процесів при розгоні електромобіля до максимальної швидкості (73,09 км/год.) з перемиканням КПП від 1-ї передачі до 4-ї передачі. Гальмування електромобіля також відбувається з перемиканням КПП від 4-ї передачі до 1-ї передачі

При русі повного електромобіля на 4-й передачі КПП з максимальним постійним сталим значенням швидкості (73,09 км/год.) тяговий двигун розвиває рушійний момент 30,32 Нм (часова діаграма 5), який урівноважує силу опору руху електромобіля 422,24 Н (часова діаграма 4).

Таким чином, при розгоні повного електромобіля до максимальної швидкості (73,09 км/год.) з перемиканням КПП від 1-ї передачі до 4-ї передачі тяговий АД розвиває момент:

$$M_{\text{розг}} = 2,36 M_{\text{ад.н.}}$$

При русі повного електромобіля на 4-й передачі з постійним сталим значенням швидкості (73,09 км/год.) тяговий АД розвиває момент:

$$M_{\text{ст.4}} = 0,846 M_{\text{ад.н.}}$$

Розглянемо один з можливих алгоритмів процесу гальмування електромобіля з рекуперацією кінетичної енергії електромобіля з послідовним перемиканням КПП від 4-ї передачі до 1-ї передачі.

При гальмуванні спочатку зменшується до нуля значення сигналу завдання швидкості електромобіля і гальмування з рекуперацією

кінетичної енергії електромобіля відбувається на 4-й передачі КПП. Привідні колеса електромобіля розвивають силу гальмування (-1180,35 Н) (часова діаграма 3), а тяговий двигун розвиває максимальне значення моменту гальмування (-84,75 Нм) (часова діаграма 5), значення якого обмежено штучно.

При зменшенні швидкості руху електромобіля приблизно до 50 км/год відбувається перемикання КПП з 4-ї передачі на 3-ю передачу. Привідні колеса електромобіля розвивають силу гальмування (-1725,0 Н) (часова діаграма 3), а тяговий двигун розвиває максимальне значення моменту гальмування (-84,75 Нм) (часова діаграма 5), значення якого обмежено штучно.

При зменшенні швидкості руху електромобіля приблизно до 33 км/год відбувається перемикання КПП з 3-ї передачі на 2-у передачу. Привідні колеса електромобіля розвивають силу гальмування (-2595,5 Н) (часова діаграма 3), а максимальне значення моменту гальмування тягового двигуна обмежено на рівні (-84,75 Нм) (часова діаграма 5).

При зменшенні швидкості руху електромобіля приблизно до 18,5 км/год відбувається перемикання КПП з 2-ї передачі на

1-у передачу. Приводні колеса розвивають силу гальмування ($-4650,0$ Н) (часова діаграма 3), а максимальне значення моменту гальмування тягового двигуна обмежено на рівні ($-84,75$ Нм) (часова діаграма 5).

Процес гальмування повного електромобіля від максимальної швидкості ($73,09$ км/год.) до повної зупинки (0 км/год.) з використанням перемикачів КПП від 4-ї передачі до 1-ї передачі відбувається за $11,12$ секунди.

На рис. 4 показано часову діаграму заданої кутової швидкості валу двигуна (діаграма 1), часову діаграму реальної кутової швидкості валу двигуна (діаграма 2) при розгоні електромобіля

до максимальної швидкості ($73,09$ км/год) з перемикачів КПП від 1-ї передачі до 4-ї передачі (часова діаграма 3). Гальмування електромобіля також відбувається з перемикачів КПП від 4-ї передачі до 1-ї передачі (часова діаграма 3). Спочатку задане значення швидкості валу АД зменшується до нуля. Починається гальмування електромобіля на 4-й передачі КПП (часова діаграма 2).

При зменшенні швидкості вала АД до $215,6$ рад./с відбувається перемикачів з 4-ї передачі на 3-ю передачу КПП. Швидкість валу АД збільшується до $314,16$ рад/с (3000 об/хв). Відбувається гальмування на 3-й передачі КПП.

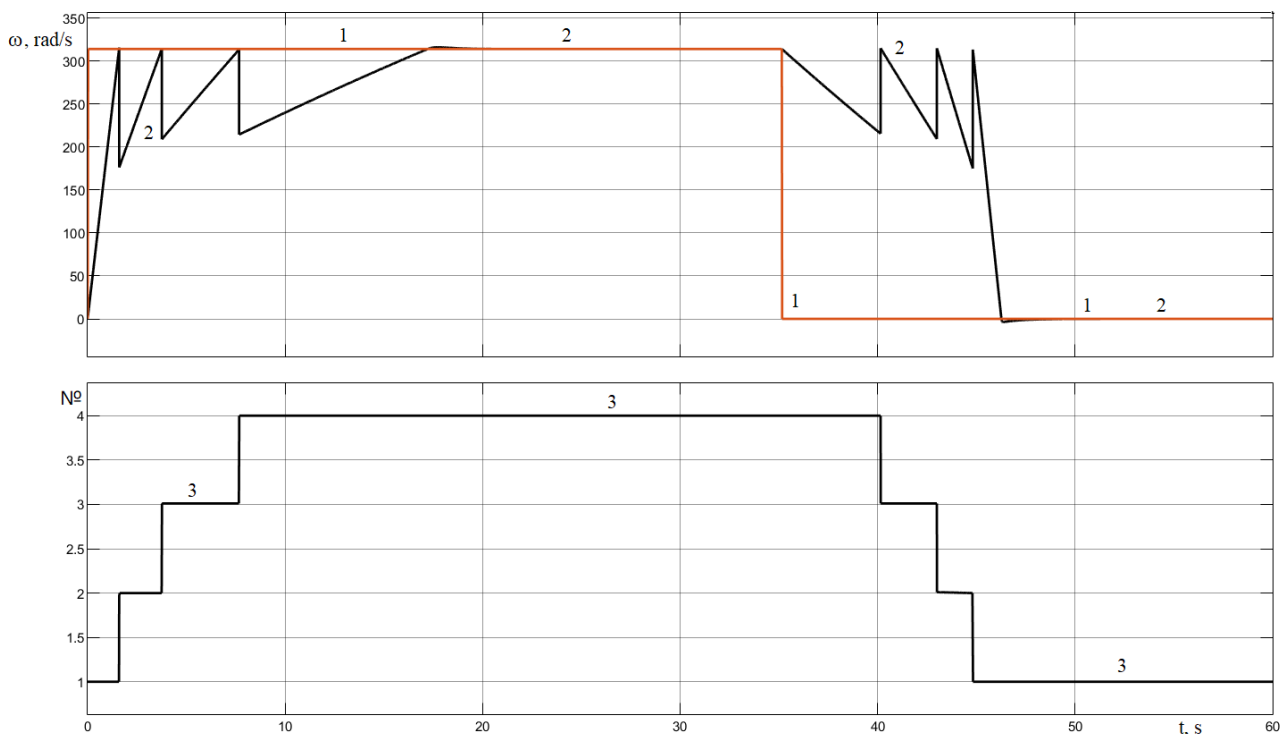


Рисунок 4 – Графіки перехідних процесів при розгоні і гальмуванні електромобіля з послідовним перемикачів передач КПП

При зменшенні швидкості вала АД до $209,4$ рад./с відбувається перемикачів з 3-ї передачі на 2-ю передачу КПП. Швидкість валу АД збільшується до $314,16$ рад/с (3000 об/хв). Відбувається гальмування на 2-й передачі КПП.

При зменшенні швидкості вала АД до $175,0$ рад./с відбувається перемикачів з 2-ї передачі на 1-ю передачу КПП. Швидкість валу АД збільшується до $314,16$ рад/с (3000 об/хв). Відбувається гальмування на 1-й передачі КПП до повної зупинки електромобіля.

Окрім того, було проведено дослідження електромеханічних процесів, які відбуваються в електромеханічній системі ЕТЗ під час гальмування електромобіля на максимальному

значенні швидкості ($73,09$ км/год.) тільки на 1-й передачі КПП, або тільки на 4-й передачі КПП.

Гальмування електромобіля при максимальному значенні швидкості ($73,09$ км/год.) тільки на на 4-й передачі КПП відбувається за $16,84$ секунди.

Висновки

1. Для того, щоб забезпечити відповідність основних технічних характеристик електромобіля і автомобіля ЗАЗ-968М (з повною масою 1200 кг), призначених для експлуатації в місті, достатньо встановити на електромобіль тяговий АД потужністю 11 кВт з номінальною синхронною кутовою швидкістю валу 314 рад/с.

2. При використанні КПП автомобіля ЗА3-968М при номінальному значенні частоти напруги на обмотці статора АД типу 4А132М2У3 (50 Гц) електромобіль може рухатись на 4-й передачі КПП зі швидкістю 73,1 км/год.

3. При русі електромобіля по горизонтальній дорозі зі швидкістю 73,1 км/год АД буде розвивати значення рушійного моменту, який не буде перевищувати 85% номінального значення моменту тягового АД. Тому температура тягового АД не буде перевищувати номінального значення температури двигуна типу 4А132М2У3 (130 °С).

4. Критичне значення крутного моменту тягового двигуна типу 4А132М2У3 у 2,8 рази перевищує номінальне значення крутного моменту. Тому при частотному регулюванні швидкості валу тягового АД типу 4А132М2У3 електромобіль короткочасно може рухатись в гору по дорозі з ухилом, який перевищує 36% (20°). Для цього треба вибрати ПЧ з достатньо великим номінальним значенням вихідного струму.

5. В порівнянні з автомобілем з ДВЗ при обмеженні повної маси електромобіля на рівні (1200 кг) його корисне навантаження зменшується від 450 кг до 360 кг. Сумарний об'єм АБ, ПЧ і АД є меншим об'єму моторного відсіку автомобіля ЗА3-968М. Тому АБ і ПЧ можна розташувати у моторному відсіку поряд з тяговим АД.

6. Час гальмування електромобіля на максимальній швидкості руху (73,09 км/год.) з рекуперацією кінетичної енергії на 4-й передачі КПП дорівнює 16,84 секунди, що може бути занадто великим при терміновому гальмуванні. Тому гальмування з рекуперацією кінетичної енергії на 4-й передачі КПП можна використовувати для поступового зменшення швидкості руху електромобіля.

7. Для більш швидкого гальмування електромобіля з рекуперацією кінетичної енергії в порівнянні з гальмуванням електромобіля на 4-й передачі КПП було розглянуто один з варіантів гальмування електромобіля з використанням перемикачів КПП з 4-ї передачі на 1-у передачу. Час гальмування дорівнює 11,12 секунди.

8. Для більш швидкого аварійного гальмування електромобіля треба застосовувати механічні гальма. Але треба звернути увагу на те, що при механічному гальмуванні кінетична енергія електромобіля не буде рекуперована до АБ, вона буде втрачена. Це призведе до зменшення максимальної відстані пересування

електромобіля на одному заряді АБ. Тому треба максимально використовувати гальмування електромобіля з рекуперацією кінетичної енергії електромобіля до накопичувача електричної енергії з повторним використанням її для наступного розгону електромобіля.

9. Для перемикачів передач КПП під час руху електромобіля необхідно користуватись педаллю зчеплення. Тому такий електромобіль буде мати три педалі: педаль зчеплення, педаль механічного гальма, педаль газу. Педаль газу буде регулювати швидкість руху електромобіля на обраній передачі КПП, при зменшенні зусилля натискання на педаль газу буде зменшуватись швидкість електромобіля з використанням електричного гальмування. Тобто процес керування цим електромобілем буде схожим на процес керування автомобілем з ДВЗ.

Список використаної літератури

5. <http://www.carpoint-e.com.ua/news/perevagi-elektromobiliv/>.
6. .Горова, К. О. Актуальність застосування електромобілів в Україні / К. О. Горова, А. В. Швердіна // Проблеми і перспективи розвитку підприємництва: зб. наук. пр. [Електронний ресурс] / Харків. нац. автомоб.-дор. ун-т. – Харків, 2015. – № 3 (10), т. 1. – С. 105–107.
7. <https://dSPACE.khadi.kharkov.ua/items/8e542530-b766-4819-a1c7-34f2381726a6>
8. <https://alecsiss.ru/ekonomichnost-elektromobilej-davajte-poschitaem/>.
9. <https://bioopt.com.ua/ua/a240346-sravnitel'naya-harakteristika-nekotoryh.html>
10. Автомобіль ЗА3-968М «Запорожець». – 2-е вид., перероб. і доп. М : Транспорт, 2008. 352 с.
11. <https://uk.wikipedia.org/wiki/ЗА3-968>.
12. <http://www.autoopt.ru/auto/encyclopedia/car/zaz/mark/zaz-968/>.
13. Волков В. П., Вільський Г. Б. Теорія руху автомобіля : підручник [Електронне видання] Суми : Університетська книга, 2015. 320 с. URL: https://document.kdu.edu.ua/info_zab/274_469.pdf (дата звернення 30.05.2025)
14. Сохацький А. В., Трофімов О. В., Фірсов О. Д. Динаміка автомобільних та інших транспортних засобів. Ч. 1. Тягово-швидкісні властивості автотранспортних засобів. Паливна економічність : навч. посібник. [Електронне видання] Дніпро : Університет митної справи та фінансів, 2018. 56 с. URL: https://document.kdu.edu.ua/info_zab/274_468.pdf (дата звернення 30.05.2025).
15. Пиндус Ю.І., Заверуха Р.Р. Електронне та мікропроцесорне обладнання автомобілів :

навч. посібник [Електронне видання] Тернопіль : ТНТУ, 2016. 209 с. URL: https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/123456789/18167/1/EMOA_Lect_FullText.pdf (дата звернення 30.05.2025).

1. Аеродинаміка автомобіля/ під ред. В.Г.Гухо, пер. з нім. М. : Энергопромиздат, 2002. 392 с.
2. <https://libarch.nmu.org.ua/handle/GenofondUA/51839>
3. https://esassets.eaton.com/DOCUMENTATION/AWA_INSTRUCTIONS/19380604.pdf
4. Вершинін Д.В., Водічев В.А., Войтенко В.А., Смотров Е.А.. Особливості вибору параметрів бортового джерела живлення електротранспортного засобу. Електромашинобудування та електрообладнання. К.: Техніка. – 2008. – Вип..71 – с.5-11.
5. https://keeppower.ua/catalog/akkumulyatory_1/keeppower_imr18650_2500mah_button_top/#tab2
6. Лазарєв Ю. Ф. Довідник з MATLAB : Електронний навчальний посібник з курсового і дипломного проектування. Київ : НТУУ "КПІ", 2013. – 132 с. URL: https://cions.kpi.ua/Arhiv/Lazarev/dovidnyk_Matlab.pdf

References

1. <http://www.carpoin-t-e.com.ua/news/perevagi-elektromobiliv/>.
2. Horova, K. O. The relevance of the use of electric vehicles in Ukraine / K. O. Horova, A. V. Sheverdina // Problems and prospects of entrepreneurship development: collection of scientific works [Electronic resource] / Kharkiv. National Automobile and Transportation University – Kharkiv, 2015. – No. 3 (10), vol. 1. – pp. 105–107.
3. <https://dSPACE.khadi.kharkov.ua/items/8e542530-b766-4819-a1c7-34f2381726a6>
4. <https://alecsiss.ru/ekonomichnost-elektromobilej-davajte-poschitaem/>.
5. <https://bioopt.com.ua/ua/a240346-sravnitel'naya-harakteristika-nekotoryh.html>
6. Car ZAZ-968M "Zaporozhets". – 2nd ed., revised and supplemented. M: Transport, 2008. 352 p.
7. <https://uk.wikipedia.org/wiki/3A3-968>.
8. <http://www.autoopt.ru/auto/encyclopedia/car/zaz/mark/zaz-968/>.
9. Volkov V. P., Vilsky G. B. Theory of vehicle movement: textbook [Electronic edition] Sumy: University book, 2015. 320 p. URL: https://document.kdu.edu.ua/info_zab/274_469.pdf (date of application 30.05.2025)
10. Sokhatsky A. V., Trofimov O. V., Firsov O. D. Dynamics of automobiles and other vehicles. Part 1. Traction and speed properties of motor vehicles. Fuel economy: textbook. [Electronic edition] Dnipro: University of Customs and Finance, 2018. 56 p. URL: https://document.kdu.edu.ua/info_zab/274_468.pdf (date of application 30.05.2025).
11. Pyndus Yu.I., Zaverukha R.R. Electronic and microprocessor equipment of automobiles: textbook [Electronic edition] Ternopil: TNTU, 2016. 209 p. URL: https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/123456789/18167/1/EMOA_Lect_FullText.pdf (date of application 30.05.2025).
12. Aerodynamics of a car/ edited by V.G. Guho, translated from German. Moscow: Energopromizdat, 2002. 392 p.
13. <https://libarch.nmu.org.ua/handle/GenofondUA/51839>
14. https://esassets.eaton.com/DOCUMENTATION/AWA_INSTRUCTIONS/19380604.pdf
15. Vershinin D.V., Vodichev V.A., Voitenko V.A., Smotrov E.A.. Features of the selection of parameters of the on-board power source of an electric vehicle. Electrical engineering and electrical equipment. K.: Technika. – 2008. – Issue..71 – p.5-11.
16. https://keeppower.ua/catalog/akkumulyatory_1/keeppower_imr18650_2500mah_button_top/#tab2
17. Lazarev Yu. F. MATLAB Handbook: Electronic textbook for course and diploma design. Kyiv: NTUU "KPI", 2013. – 132 p. URL: https://cions.kpi.ua/Arhiv/Lazarev/dovidnyk_Matlab.pdf

Single-Band Traction Electric Drive of a City Light Vehicle

V. Voitenko, V. Vodichev, O. Kalinin, V. Gladchenko

Odesa National Polytechnic University

Abstract. The analysis of the technical parameters of the transmission of a passenger car with an engine, which is to be converted into an electric vehicle, was carried out. The requirements for the technical parameters of the electric vehicle were formulated. The dependence of the resistance force of the electric vehicle on the speed of the electric vehicle on a horizontal road was determined, the dependence of the value of the power of the mechanical energy that the drive wheels of the electric vehicle should develop on the

speed of the electric vehicle was calculated, the dependence of the amount of mechanical energy consumed by the drive wheels of the electric vehicle on the speed of the electric vehicle on a horizontal road for a distance of 100 km was determined. A traction induction motor and a frequency converter for it were selected. The main parameters of the on-board source of electric energy of an electric vehicle have been calculated. The parameters of the traction electric drive of an electric vehicle have been synthesized. A mathematical model of a single-zone traction electric drive of an electric vehicle has been developed. The mathematical model has been used to study electromechanical transient processes that occur in a single-zone traction electric drive of an electric vehicle during acceleration and braking of an electric vehicle.

Keywords: *electric vehicle, induction motor, electric drive, accumulator battery, electric energy, mathematical model, transient processes.*

Отримано 20.08.2025



Войтенко Володимир Андрійович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електромеханічної інженерії, Національний університет «Одеська політехніка»; проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна.
E-mail: voitenko@op.edu.ua; тел. +38 048 705 8467

Volodymyr Voytenko, Ph.D, Associate Professor of the Department of Electromechanical Engineering, Odessa National Polytechnic University; 1, Shevchenko Avenue, Odessa, 65044, Ukraine. E-mail: voitenko@op.edu.ua; ph.: +38 048 705 8467

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2525-6913>



Водічев Володимир Анатолійович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри електромеханічної інженерії, Національний університет «Одеська політехніка»; проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна.
E-mail: vva@eei.opu.ua, тел. +38 050 234 7722

Volodymyr Vodichev, Dr. of Science, Professor, Professor of the Department of Electromechanical Engineering, Odessa National Polytechnic University; 1, Shevchenko Avenue, Odessa, 65044, Ukraine. E-mail: vva@eei.opu.ua, ph.: +38 050 234 7722,

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7204-1149>



Калінін Олександр Георгійович, старший викладач кафедри електромеханічної інженерії, Національний університет «Одеська політехніка»; проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна. E-mail: agk@opu.ua, тел. +38 050 392 1298

Alexander Kalinin, senior lecturer of the Department of Electromechanical Engineering, Odessa National Polytechnic University; 1, Shevchenko Avenue, Odessa, 65044, Ukraine. E-mail: agk@opu.ua, ph.: +38 050 392 1298

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2654-9969>



Гладченко Володимир Олександрович, інженер кафедри динаміки і механічної інженерії, Національний університет «Одеська політехніка»; проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна.
E-mail: gladec@opu.ua, тел. +38 096 414 2049

Volodymyr Gladchenko, inginer Department of Denamics and Mechanical Engineering, Odessa National Polytechnic University; 1, Shevchenko Avenue, Odessa, 65044, Ukraine. E-mail: gladec@opu.ua; ph.: +38 096 414 2049

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0000-0220-1509>