

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Одеська політехніка»

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ ТА КОМП'ЮТЕРНІ СИСТЕМИ

- **Автоматизовані електромеханічні системи**
- **Системи виробництва, передачі та розподілу електроенергії**
- **Теоретична електротехніка**
- **Комп'ютерні системи, мережі та їх компоненти**
- **Автоматизація процесів управління**
- **Енергозбереження засобами сучасної електротехніки**

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЖУРНАЛ
ЗАСНОВАНО В 1965 РОЦІ

№ 45 (121)

Одеса
2026

DOI: <https://doi.org/10.15276/eltecs.45.121.2026>

УДК 004+62-5+621.3

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 дослідженнями, проектуванням та експлуатацією електротехнічних та комп'ютерних систем та їх компонентів, а також на викладачів і студентів вищих та середніх учбових закладів відповідних спеціальностей.

Друкується за рішенням Вченої ради Національного університету «Одеська політехніка» від 24.12.2025, протокол № 8

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. И. 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 (Онлайн)

ISSN 2221-3805 (Друк)

Ministry of Education and Science of Ukraine
Odesa Polytechnic National University

ELECTROTECHNIC AND COMPUTER SYSTEMS

- **Automated Electromechanical Systems**
- **Electric Power Generation, Transmission and Distribution Systems**
- **Theoretical Electrical Engineering**
- **Computer Systems, Networks and Their Components**
- **Automation of Management Processes**
- **Energy Saving by Means of Modern Electrical Engineering**

SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL
FOUNDED IN 1965

No. 45(121)

Odesa
2026

DOI: <https://doi.org/10.15276/eltecs.45.121.2026>

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 24.12.2025, No. 8

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, Shevchenko Avenue, 1, 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 (Online)

ISSN 2221-3805 (Print)

ЗМІСТ		CONTENTS	
	Стор.		Page
Бойко А. О., Найденко О. В., Заброцький С. М., Іванов В. В., Малішевський С. А. Енергетичний аналіз перехідних процесів асинхронних двигунів ліфтів.....	6	Boyko A. O., Naidenko O. V., Zabrotskyi S. M., Ivanov V. V., Malishevskiy S. A. Energy Analysis of Transient Processes of Asynchronous Elevator Motors.....	6
Шевчук О. С. Багатоагентна система автоматичного керування сучасним електроприводом в епоху Індустрії 4.0.....	15	Shevchuk O. S. Multi-agent System of Automatic Control of a Modern Electric Drives in the Age of Industry 4.0.....	15
Стецюк Д. В. Ймовірнісний критерій оцінювання гарантоздатності критичних електротех- нічних систем	22	Stetsiuk D. V. Probabilistic Criterion for Evaluation of the Dependability of Critical Electrotechnical Systems.....	22
Маєвський Д. А, Маєвська О. Ю, Квітчук В. В, Лавриненко В. О. Метод відновлення параметрів перехід- них процесів в задачах безпеки критичних інфраструктур	32	Maevsky D. A., Maevskaya O. J., Kvitchuk V. V., Lavrynenko V. A Method for Reconstructing Transient Process Parameters in Critical Infrastructure Security Applications	32
Савін А. А., Ситніков В. С. Категорії невизначеності, що впливають на інформаційні системи управління проектами	44	Savin A. A., Sytnikov V. S. Categories of Uncertainty Affecting Project Management Information Systems	44
Молодожон Ю. М. Визначення кількості контейнерів для твердих побутових відходів на основі динамічних демографічних даних.....	61	Molodozhon Yu. M. Determining the Number of Solid Waste Containers Based on Dynamic Demographic Data	61
Брунеткін О. І., Філіппов Є. Г., Іванєєв А. М., Тафій В. В. Дослідження термохімічної конверсії органічних речовин у комбінованому газогенераторі	71	Brunetkin O. I., Filippov E. G., Ivaneev A. M., Tafiy V. V. Study of Thermochemical Conversion of Organic Substances in a Combined Gas Generator.....	71
Разінков В. О. Аудит роботи електричного обладнання розподільних та генеруючих мереж	82	Razinkov V. O. Audit of the Operation of Electrical Equipment of Distribution and Generating Networks.....	82
Войтенко В. А., Водічев В. А., Калінін О. Г. Оптимізація потужності втрат двигуна постійного струму регулюванням струму збудження	89	Voitenko V. A., Vodichev V. A., Kalinin O. G. Optimization of DC Motor Power losses by Controlling the Excitation Current	89

Енергетичний аналіз перехідних процесів асинхронних двигунів ліфтів

А. О. Бойко¹, доктор технічних наук, професор

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0048-9259>; e-mail: a.o.boyko@op.edu.ua;
Scopus Author ID: 57202752287; Websites & social links: <https://op.edu.ua/staff/32211>

О. В. Найденко¹, кандидат технічних наук, доцент

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5684-5617>; e-mail: avnaidenko@op.edu.ua;
Scopus Author ID: 57362920200

С. М. Заброцький¹, аспірант

ORCID: <http://orcid.org/0009-0008-7899-7150>; e-mail: zabroczkijoo@gmail.com

В. В. Іванов¹, аспірант

ORCID: <http://orcid.org/0009-0002-1820-4418>; e-mail: vadziliyviktorovich@gmail.com

С. А. Малішевський¹, аспірант

ORCID: <http://orcid.org/0009-0005-4477-5048>; e-mail: s.malishevskiy@gmail.com

¹ Національний університет «Одеська політехніка»

Анотація. У статті проведено аналіз особливостей енергетики ліфтових двошвидкісних асинхронних двигунів у динамічних режимах. Досліджено режими роботи при варіативних моментах навантаження та інерції, характерних для ліфтового електроприводу. Встановлено, що облік електромагнітних перехідних процесів істотно впливає на енергетичні показники пуску, гальмування та реверсу, особливо за нульових початкових електромагнітних умовах. Показано, що формування керуючих впливів дозволяє скоротити тривалість перехідних процесів і знизити енергетичні втрати. Визначено, що зменшення перехідних моментів за рахунок змінного кута включення вентилів тиристорної системи управління значно покращує енергетику перехідних процесів у ліфтових двигунах. Економія енергії, що досягається, нелінійно залежить від обраного значення кута управління вентилів і має екстремум. Результати забезпечують наукову основу для розробки алгоритмів управління, які забезпечують високу динаміку та енергоефективність роботи редукторних ліфтових лебідок традиційної конструкції в умовах змінних експлуатаційних параметрів.

Ключові слова: енергетика, ліфтовий асинхронний двигун, електропривід, перехідні процеси, тиристорне керування, початкові електромагнітні умови.

Цитування статті: Бойко А. О., Найденко О. В., Заброцький С. М., Іванов В. В., Малішевський С. А. (2026). Енергетичний аналіз перехідних процесів асинхронних двигунів ліфтів. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*, 45(121), с.6-14. doi:<https://doi.org/10.15276/eltecs.45.121.2026.1>

Вступ

Необхідним умовам типових оптимальних діаграм руху мінімально задовольняють пасажирські ліфти з лебідками з черв'ячними редукторами, двошвидкісними асинхронними двигунами (АД) і нерегульованими системами управління. Такі ліфтові лебідки завдяки широкому застосуванню характеризуються як «лебідки традиційної конструкції» [1]. В даний час, пасажирськими ліфтами з подібними лебідками в Україні масово обладнані житлові багатоповер-

хові будинки, які будувалися з початку 70-х років минулого століття.

Тиристорні системи управління лебідками «традиційної конструкції» застосовуються як заміна релейно-контакторних систем управління. Їх основні переваги полягають у простоті схем управління, високій надійності безконтактної апаратури, достатньої плавності пускогальмівних перехідних процесів, практичній відсутності налагоджувальних робіт при введенні в експлуатацію та в ході експлуатації, простоті

© Бойко А. О., Найденко О. В., Заброцький С. М., Іванов В. В., Малішевський С. А., 2026

Ця стаття відкритаго доступу за ліцензією CC BY (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk>)

експлуатації. При цьому в переважній більшості випадків йдеться про нерегульовані тиристорні системи управління асинхронними двошвидкісними ліфтовими двигунами [2]. Застосовувані тиристорні системи управління фактично виконують функції безконтактних комутаційних пристроїв - пускачів, що забезпечують пуск, гальмування та обертання двошвидкісних ліфтових асинхронних двигунів в обох напрямках з урахуванням заданих вимог.

1 Аналіз літератури та постановка проблеми

Особливістю енергетики перехідних процесів асинхронних ліфтових електроприводів у некерованих режимах є наявність вільної складової електромагнітного моменту [3,4]. Вільна складова значно впливає на ефективність перетворення енергії та багаторазове коливальне загаює перетворення енергії між статором та ротором асинхронного двигуна [5]. Найчастіше колювання електромагнітного моменту призводять до коливального обміну енергією між контурами двигуна і погіршення енергетичних показників [6]. Але, можливі й протилежні випадки, коли дія електромагнітного перехідного моменту покращує енергетику процесу [7]. Тому алгоритми тиристорного управління, що забезпечують зменшення інтенсивності електромагнітних процесів або, навпаки, їх спеціального формування, сприяють поліпшенню як динаміки, так і енергетики електроприводу ліфтів [8].

Метою досліджень є аналіз особливостей енергетики перехідних процесів ліфтових двошвидкісних асинхронних двигунів з тиристорною системою управління.

2 Основний матеріал дослідження

Енергетика процесу пуску. Розглянемо вплив електромагнітних перехідних процесів на енергетику прямого некерованого пуску обмотки високої швидкості ліфтового асинхронного двигуна АСС 92-6/24 з нульовими початковими електромагнітними умовами з двократним моментом інерції. При пуску вхолосту в обмотці ротора виділяється енергія втрат ΔA_{M2} , що дорівнює кінетичній енергії електроприводу, накопиченої за час пуску [9]. В обмотці статора за цей час виділиться енергія ΔA_{M1} , пропорційна енергії втрат в обмотці ротора і відношенню опорів обмоток

$$A_{M1} = \Delta A_{M2} \frac{R_1}{R_2} \quad (1)$$

Тут і далі чисельні вирази енергії втрат приводяться у відносних одиницях, де за основу прийнята кінетична енергія електроприводу при синхронній швидкості.

Якщо за час пуску прийняти час досягнення синхронної швидкості, то втрати в обмотці ротора становлять 1,342, тобто на 34,2% більше, ніж теоретично очікувані. Втрати в обмотці статора за цей час (1) склали 1,33. Справжні втрати обмотці статора, визначені інтегруванням його квадратичних струмів, склали 1,735. Різниця у втратах пояснюється урахуванням в останньому випадку вільної складової струму статора і наявності в ньому складової струму намагнічування, що не враховується виразом (1). Досягнення швидкістю значення синхронної, також означає закінчення процесу пуску. Далі йде процес перерегулювання та затухаючі колювання щодо синхронної швидкості. За час згасання в обмотці статора виділяється додатково ще 2.3% та в роторі до 1% енергії. Вказані цифри збільшення втрат в обмотках двигуна можна вважати типовими.

Зі зростанням моменту інерції відносно збільшення втрат стає менше, оскільки збільшується база, за якою розраховується енергія, хоча абсолютні значення втрат збільшуються майже пропорційно до збільшення інерційності. Наприклад, при сумарному моменті інерції 8, 20 і 50 $J_{дв}$ відносні втрати в роторі становлять 1,23; 1,064 та 1,018 відповідно. Таким чином, електромагнітні перехідні процеси сприяють збільшенню втрат при пуску і поліпшенню енергетики пуску в усіх випадках є актуальним завданням, навіть при значному, до 20 - 50-кратному збільшенню моменту інерції приводу. При керованому пуску очікується, що у зв'язку зі зменшенням, або повною ліквідацією вільних складових струму, енергетика може бути поліпшена [10].

Відомі три найбільш поширені способи управління пуском АД: безударний пуск, пуск з постійним значенням кута включення вентилів тиристорного пускача і пуск зі змінним кутом включення. Відповідно до алгоритму безударного пуску спочатку проводиться включення двох фаз обмотки статора на лінійну напругу з кутом 90 ел. град. щодо цієї напруги, а потім, через чверть періоду, коли настає максимум фазної напруги третьої фази мережі, проводиться підключення третьої фази обмотки статора. При такому детермінованому пофазному включенні аперіодична складова струму намагнічування не виникає, відповідно відсутні і перехідні складові електромагнітного моменту [11]. Осцилограми пуску двигуна, прямого некерованого та безударного, наведені на рисунках 1, 2, відповідно.

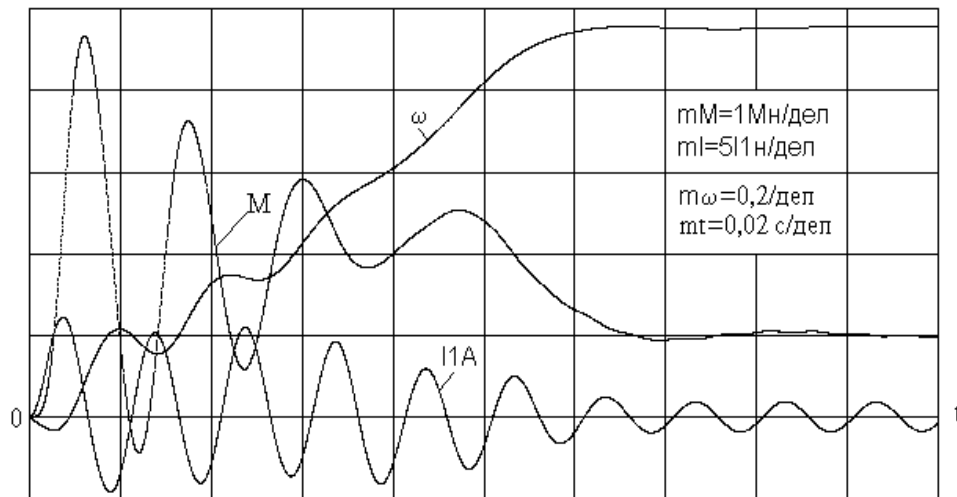


Рис.1 - Осцилограми координат АД при прямому пуску від мережі,
 $M_c = 1M_n, J_{сум} = 2J_{дв}$

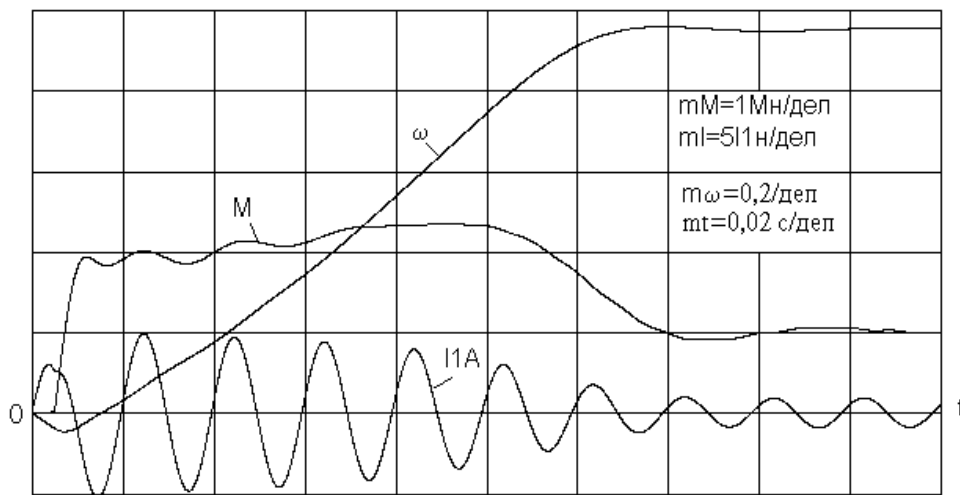


Рис.2 - Осцилограми координат АД при керованому безударному пуску,
 $M_c = 1M_n, J_{сум} = 2J_{дв}$

Особливістю способу є те, що протягом 0,005с або чверті періоду, АД знаходиться в двофазному режимі живлення, момент його дорівнює нулю, а пуск (зміна швидкості) починається тільки після підключення до мережі третьої фази обмоток [12]. Такий пуск можна назвати пуском з ненульовими початковими електромагнітними умовами (ПЕМУ). Втрати в обмотках, при цьому значно зменшені в порівнянні з прямим пуском. Наприклад, для ліфтового двигуна АСС 92-6/24, втрати в роторі збільшені лише на 12,2%. В них «міститься» 5,7% втрат під час двофазного включення двигуна, коли пуск ще не почався. І все ж таки, це ~5% втрат у роторі і, відповідно в статорі АД, які можна вважати додатковими по відношенню до класичного виразу втрат. Особливістю способу є те, що час безударного пуску, навіть з урахуванням часу двофаз-

ного включення, для двигунів з висотою осі 100 мм практично не змінюється. Для двигунів з висотою осі 160 та 280 мм воно зменшується порівняно з прямим некерованим пуском [7].

Пригнічення перехідних моментів за рахунок введення постійного або змінного кута включення вентилів значно покращує енергетику пуску. Економія енергії, що досягається, нелінійно залежить від обраного значення кута α і має екстремум. Наприклад, при постійному куті управління найкращі результати дає $\alpha = 75$ ел. град. При лінійній зміні кута із заданим часом 0,2 с найкращі результати дає випадок з початковим значенням кута 60 ел. град.

Тут, очевидно, треба вибирати максимальне поєднання ступеня зменшення перехідних моментів зі збільшенням кута управління та ступеня впливу вищих гармонік струмів. При плавному

пуску під навантаженням час знаходження АД в області підвищених ковзань збільшується, втрат обмоток зростають і можуть перевищити втрати при прямому пуску, тому тиристорний плавний пуск під навантаженням слід застосовувати обережно, щоб уникнути зайвих втрат (табл. 1). Очевидно, виграшним у цих випадках стає безударний пуск.

Таблиця 1 - Енергетика процесу плавного пуску вхолосту двигуна АСС 92-6/24 ($J_{\Sigma} = 2J_{дв}$)

α , ел. град.	$t_{п}$, с	$\frac{\Delta A_{M1,2}}{\Delta A_{M1,2н}}$	$\frac{\Delta A_{M1}}{\Delta A_{M1н}}$	$\frac{\Delta A_{M2}}{\Delta A_{M2н}}$
70	0,2389	3,233	1,967	1,266
80	0,2915	3,348	2,136	1,212
90	0,4237	3,515	2,215	1,300
100	0,8001	3,624	2,299	1,325

Енергетика процесу реверсу. Процес реверсу складається із двох етапів. У першому проводиться гальмування до нульової швидкості в режимі противмикання, у другому - розгін або пуск у протилежний бік. Теоретично енергія втрат в обмотці ротора за час гальмування противмиканням вхолосту повинна становити триразове значення кінетичної енергії приводу. Таке уявлення відповідає противмиканню з нульовими початковими електромагнітними умовами, хоча завдяки першому піку електромагнітного моменту і більш інтенсивному гальмуванню, на практиці, енергія втрат може виявитися меншою. Наприклад, для ліфтового двигуна АСС 92-6/24 при противмиканні без додаткового моменту інерції перший пік моменту становить $4,6M_n$ і втрати в роторі $\Delta A_{M2} = 2,15$. При $J_{\Sigma} = 5J_{дв}$ вже $\Delta A_{M2} = 3,26$ і тільки при $J_{\Sigma} = 20$ втрати в роторі наближаються до теоретичних чотирикратних. Розглянутий випадок противмикання з нульовими ПЕМУ можна розглядати як теоретичний. Реально процес реверсу починається з незагаслим магнітним полем, оскільки мінімальна пауза, необхідна для закривання тиристорів ТПН однієї групи та відкривання іншої групи становить половину періоду напруги мережі або 0,01 с. За цей час магнітний потік практично не згасає по абсолютній величині, але значно змінюється фаза або кут між узагальненим вектором напруги мережі та вектором потокозчеплення ротора. При прямому підключенні до мережі зі змінним порядком чергування фаз в АД збуджується електромагнітний момент великої амплітуди, наприклад для двигуна, що розглядається, він становить $9,7M_n$. При такому імпульсі моменту, АД, навіть з великим моментом інерції інтенсивно гальмується [12]. Причому цей процес не має нічого

спільного з процесом параметричного регулювання, так як значне зменшення швидкості відбувається під дією одного імпульсу моменту при незмінному ковзанні або ковзанні, що змінюється незначно. В результаті втрати в обмотці ротора АД виявляються набагато меншими за очікувані. Так, при гальмуванні АСС 92-6/24 без додаткової інерційності втрати в обмотці ротора $\Delta A_{M2} = 1,2$, що втричі менше від очікуваних і близькі до теоретичних втрат при пуску. Збільшення моменту інерції дещо нівелює цей ефект, але навіть за його значного збільшення втрати залишаються меншими, ніж при реверсі АД з нульовими ПЕМУ. Наприклад, за $J_{\Sigma} = 2; 5; 10$; втрати у роторі становлять 1,893; 2,971; 3,563. Аналогічна залежність і в обмотці статора АД.

Особливістю процесу реверсу є швидке згасання електромагнітних перехідних моментів, тому під час підходу до нульової швидкості двигун фактично працює статичної механічної характеристики [13]. Тому енергетика другого етапу реверса-розгону у зворотний бік має бути ближчою до ідеального теоретичного випадку, ніж у розглянутих випадках пуску. Справді, починаючи з сумарного моменту інерції $J_{\Sigma} = 2$ і вище, енергетика розгону не залежить від початкових електромагнітних умов противмикання, а втрати виявляються ближче до класичної одиниці. Наприклад, за $J_{\Sigma} = 2; 5; 10; 20$ втрати в роторі за час розгону становили 1,18; 1,11; 1,019; 1,014; 1,009. Різниця у втратах у випадках з нульовими та ненульовими ПЕМУ проявляється у третьому-четвертому порядку значень. При $J_{\Sigma} < 2J_{дв}$ починає проявлятися дія незатухаючих електромагнітних моментів. Це особливо проявляється, якщо реверс АД починався за ненульових початкових електромагнітних умов.

У табл. 2 наведено характерні значення енергетики противмикання з ненульовими ПЕМУ та розгону ЕМС за різних сумарних моментів інерції.

Таблиця 2 - Втрати енергії під час противмикання та розгону двигуна АСС 92-6/24 при реверсі з ненульовими ПЕМУ

Режим	Параметр	Сумарний момент інерції електроприводу		
		$3J_n$	$2J_n$	J_n
Противключення	ΔA_{M2}	1,894	1,452	1,119
	$t_{п}, с$	0,0537	0,0322	0,0212
Розгін	ΔA_{M2}	1,134	1,519	1,727
	$t_p, с$	0,0827	0,0509	0,0402

Дані таблиці ще раз підтверджують, що наявність електромагнітних перехідних моментів

прискорює процес гальмування противмиканням та зменшує втрати в АД, але погіршує енергетику розгону та збільшує його час.

Втрати в обмотці ротора за час розгону при різних значеннях моменту інерції досягають кількох максимумів і мінімумів. Причому максимальні значення можуть набагато перевищувати втрати за будь-яких інших розглянутих процесах пуску. При зміні параметрів двигуна, поточного моменту навантаження чи моменту інерції дані табл. 2 зміняться, але загальний характер зміни енергетики збережеться. Цікавим представляється розгляд балансу втрат у ланцюзі ротора АД за час реверсу, не поділяючи його на етапи. Так, для ліфтового двигуна АСС 92-6/24 при реверсі з ненульовими ПЕМУ і сумарних моментах інерції 1; 2; 5; 10; 20; 50 реальна енергія втрат у роторі 2,846; 2,971; 3,541; 3,801; 3,988; 3,977, замість розрахункового чотириразового значення.

Керований процес реверсу можна здійснювати за аналогією з пуском трьома способами, проте на практиці широко використовується тільки один - з кутом включення вентилів, що змінюється у часі [7]. Постійний кут включення, хоч і послабить дію перехідних складових моменту на початковому етапі, але надалі лише затягуватиме процес. Причому, як і при звичайному пуску, існує загроза "застрягання" двигуна. Безударний реверс теоретично можливий, але для цього необхідно послабити амплітуду залишкового магнітного потоку майже в два рази і зробити підключення двигуна при певному взаємному розташуванні узагальнених векторів потокозчеплення ротора і напруги мережі. Останнє не становить труднощів, що стосується першого, то природне спадання магнітного потоку не завжди прийнятне через велику тривалість, а штучне його гасіння вимагатиме ускладнення схеми силової частини електроприводу. Тому раціональним є введення на деякий час фазового управління з метою зменшення вільних складових струмів і потоків з подальшим плавним повним відкриванням вентилів. Час дії фазового управління залежить від величини двох основних інерційностей - електромагнітної та електромеханічної. У будь-якому випадку, зі збільшенням потужності та габариту двигуна цей час необхідно збільшувати. Для аналізованого у прикладах випадку двигуна з $M_c = 0$, для ефективного придушення перехідних моментів досить запровадити фазове управління тимчасово до 0,1с. Дані розрахунків процесу реверсу наведено у табл. 3.

Відомо, що при противмиканні з ненульовими ПЕМУ для суттєвого зменшення перехідних складових потрібно більш глибоке регулю-

Таблиця 3 - Відносини втрат при керованому реверсі двигуна АСС 92-6/24 з ненульовими ПЕМУ

Начальний кут управління	$\frac{\Delta A_{M1,2}}{\Delta A_{M1,2H}}$	$\frac{\Delta A_{M1}}{\Delta A_{M1H}}$	$\frac{\Delta A_{M2}}{\Delta A_{M2H}}$	t_p, c
140	9,450	5,201	4,249	0,284
100	8,893	5,013	3,880	0,243
60	8,219	4,691	3,528	0,225
0	7,516	4,059	3,457	0,193

вання кута включення порівняно, наприклад, з пуском. Так, запровадження початкового кута 120 ел. град. обмежує амплітуду моменту до 4,5, що більше, ніж амплітуда моменту під час пуску. Лише ввівши $\alpha_{поч} = 150$ ел. град., можна досягти зменшення амплітуди моменту до $2M_n$. З іншого боку, значне зменшення перехідних складових наближає енергетику реверсу до класичного випадку, коли енергія втрат в обмотці ротора прагне чотириразового значення і збільшує час реверсу. З проведеного фізичного експерименту випливає, що чим більше будуть пригнічені перехідні складові струмів та моментів, тим більше стають час реверсу та втрати в обмотках. Останнє не завжди справедливо щодо втрат. Наприклад, при $\alpha_{поч} = 100$ ел. град. спостерігаються мінімальні порівняно з іншими випадками втрати в АД. Тут, як і при пуску, у необхідних випадках при формулюванні вимог до алгоритму реверсу, слід вибирати компромісне рішення, враховуючи допустимі значення трьох величин: часу процесу, амплітуди імпульсу моменту та втрат в обмотках.

Висновки

Аналіз особливостей енергетики в динамічних режимах ліфтових двошвидкісних асинхронних двигунів дозволив виявити основні закономірності формування керуючих впливів з подальшою можливістю формування оптимальних процесів по швидкодії та мінімізації втрат. Електромагнітні перехідні процеси сприяють збільшенню втрат при пуску. Покращення енергетики пуску в усіх випадках є актуальним завданням, навіть при значному, до 20 - 50 - кратному збільшенні моменту інерції електроприводу.

Зменшення перехідних моментів за рахунок введення постійного або змінного кута включення вентилів значно покращує енергетику пуску двигунів. Економія енергії, що досягається, нелінійно залежить від обраного значення кута управління вентилів і має екстремум.

Наявність гальмівного статичного моменту на валу ліфтового двошвидкісного двигуна при

реверсі зменшує час і втрати на першому етапі реверсу, при противмиканні, і збільшує їх на другому етапі - розгоні в протилежний бік.

Не підтверджується припущення, що вплив моменту навантаження асинхронних двигунів на усереднені втрати за цикл може бути компенсованим, а енергетика реверсу з реактивним характером навантаження буде близька до енергетики вхолосту. Насправді, в діапазоні моментів інерції від 1 до 10 $J_{дв}$ втрати в обмотках при реверсі з номінальним моментом в 1,5 ... 1,8 разів менше, ніж при реверсі вхолосту. Час реверсу АД під навантаженням завжди менше, ніж у холосту.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів стосовно поточного дослідження, включаючи фінансові, особисті, авторські чи будь-які інші, які могли б вплинути на дослідження, а також на результати, представлені в цій статті.

Фінансування

Дослідження проводилося за рахунок особистих коштів авторів.

Список використаної літератури

1. Neeraj, N. and Pathirikkat, G. (2016). Energy efficient multiquadrant drive for induction motors. [online] *2016 International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI)*, IEEE, Coimbatore, India, pp.1023–1034. doi:<https://doi.org/10.1109/ICCCI.2016.7480030>.
2. Бойко А. О., Семенюк В. Ф., Соколов Я. О., Зубак В. В. (2020). Особливості підвищення ефективності ліфтових лебідок традиційної конструкції. *Підйомно-транспортна техніка*, 1(62), с.29-43. Доступно за адресою: <https://ptt-journals.net/files/2020-1-62-03.pdf> [Доступ отримано 19 березня 2026].
3. Nabyarimana, M. and Dorrell, D.G. (2017). Methods to reduce the starting current of an induction motor. [online] *2017 IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering (ICPCSI)*, Chennai, India, pp.34–38. doi:<https://doi.org/10.1109/ICPCSI.2017.8392319>.
4. Langlang Gumilar, Arif Nur Afandi, Sujito and M. Rodhi Faiz (2021). Starting Induction Motor at Different Voltage Levels in the Electrical Power System. [online] *2021 International Conference on Electrical and Information Technology (IEIT)*, IEEE, Malang, Indonesia, pp.269-273. doi:<https://doi.org/10.1109/IEIT53149.2021.9587354>.
5. Lee, K., Lukic, S. and Sara, A. (2016). A universal restart strategy for induction machines, *2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Milwaukee, WI, USA, pp.1344–1359. doi:<https://doi.org/10.1109/ECCE.2016.7854802>.
6. Ongun, E. and Demir, A. (2017). Improving the performance and energy efficiency of elevators by direct-landing elevator position control system. *2017 4th International Conference on Electrical and Electronic Engineering (ICEEE)*, IEEE, Ankara, Turkey, pp. 834–849. doi:<https://doi.org/10.1109/ICEEE2.2017.7935825>.
7. Langlang, G., Dezetty, M., Mokhammad, S. and 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)*, Manado, Indonesia, pp.1-5, doi:<https://doi.org/10.1109/ICORIS50180.2020.9320791>

Наявність даних

В тексті статті доступні усі дані, як у числовій, так і в графічній формах.

Використання штучного інтелекту

Автори заявляють про використання інструменту штучного інтелекту: ChatGPT model (OpenAI GPT-5, версія 2025), номер 5.0.1. Інструмент штучного інтелекту використовувався при формуванні структурних елементів «Анотація», «Висновки», надані інструментом штучного інтелекту, зменшили вплив лексичних та граматичних помилок.

Внесок авторів

Бойко А. О.: наукове керівництво, розробка методології, формування початкової версії тексту, загальне адміністрування та фінансування; *Найденко О. В.*: концептуалізація та дослідження, візуалізація матеріалу, редагування основного тексту статті; *Заброцький С. М.*: формування та оформлення списку літератури; *Іванов В. В.*: формування анотації та вступу; *Малішевський С. М.*: формування та редакція загальних висновків.

8. Michaelides, A. and Nicolaou, T. (2017). Starting and running the induction motor with a variable capacitor. *2017 14th International Conference on Engineering of Modern Electric Systems (EMES)*, Oradea, Romania, pp.87-90. doi:<https://doi.org/10.1109/EMES.2017.7980388>
9. Jiang, X., Namokel, M., Hu, C., Tian, R. and Dong, J. (2019). Research on Energy Saving Control of Elevator. *2019 International Conference on Control, Automation and Information Sciences (ICCAIS)*, Chengdu, China, pp.1–5. doi:<https://doi.org/10.1109/iccais46528.2019.9074551>.
10. Zhang, Y. and Dong, J. (2022). Design and Implementation of Energy Saving Elevator Control System based on Single Chip Microcomputer. *2022 IEEE International Conference on Advances in Electrical Engineering and Computer Applications (AEECA)*, Dalian, China, pp.236–240. doi:<https://doi.org/10.1109/aeeeca55500.2022.9918820>.
11. Андриющенко, О., А., Бойко, А., А., Бабийчук, О., Б. (2010). Анализ энергетической эффективности электроприводов пассажирских лифтов. *Вісник національного технічного університету «ХПИ», Харків: [НТУ «ХПИ»]*, 28, с.503-504. Доступно за адресою: <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/20406b87-e2b7-48d6-83ec-b2aca5764247> [Доступ отримано 19 березня 2026].
12. Андриющенко О. А., Бойко А. О., Бібик А. В., Бабийчук О. Б. (2012). Энергетичні показники електроприводу пасажирського ліфту з двошвидкісним асинхронним двигуном. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи, Кременчук, [КрНУ]*, 3(19), pp.205-208. Доступно за адресою: https://ees.kdu.edu.ua/statti/2012_3_205.pdf [Доступ отримано 19 березня 2026]
13. Mathew, S., Mogre, P., Chouthai, R., Karandikar, P. B. and Kulkarni, N. R. (2017). Supercapacitor based energy recovery system for an elevator. *2017 International Conference on Advances in Computing, Communication and Control (ICAC3)*, Mumbai, India, pp.2034-2049. doi:<https://doi.org/10.1109/icac3.2017.8318788>

References

1. Neeraj, N. and Pathirikkat, G. (2016). Energy efficient multiquadrant drive for induction motors. [online] *2016 International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI)*, IEEE, Coimbatore, India, pp.1023–1034. doi:<https://doi.org/10.1109/ICCCI.2016.7480030>.
2. Boyko, A. A., Semenyuk, V. F., Sokolov, Ya. A., Zubak, V. V. (2020). Osobennosti povishensja effektivnosti liftovih lebedok tradizionnoy konstrukzii [Features of increasing the efficiency of elevator winches of traditional design]. *Pidyomno-transportna tekhnika [Lifting and transport equipment]*, 1(62), pp.29-44. Available at: <https://ptt-journals.net/files/2020-1-62-03.pdf> [Accessed 19 Mar. 2026].
3. Habyarimana, M. and Dorrell, D.G. (2017). Methods to reduce the starting current of an induction motor. [online] *2017 IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering (ICPCSI)*, Chennai, India, pp.34–38. doi:<https://doi.org/10.1109/ICPCSI.2017.8392319>.
4. Langlang Gumilar, Arif Nur Afandi, Sujito and M. Rodhi Faiz (2021). Starting Induction Motor at Different Voltage Levels in the Electrical Power System. [online] *2021 International Conference on Electrical and Information Technology (IEIT)*, IEEE, Malang, Indonesia, pp.269-273. doi:<https://doi.org/10.1109/IEIT53149.2021.9587354>.
5. Lee, K., Lukic, S. and Sara, A. (2016). A universal restart strategy for induction machines, *2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Milwaukee, WI, USA, pp.1344–1359. doi:<https://doi.org/10.1109/ECCE.2016.7854802>.
6. Ongun, E. and Demir, A. (2017). Improving the performance and energy efficiency of elevators by direct-landing elevator position control system. *2017 4th International Conference on Electrical and Electronic Engineering (ICEEE)*, IEEE, Ankara, Turkey, pp. 834–849. doi:<https://doi.org/10.1109/ICEEE2.2017.7935825>.
7. Langlang, G., Dezetty, M., Mokhammad, S. and 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)*, Manado, Indonesia, pp.1-5, doi:<https://doi.org/10.1109/ICORIS50180.2020.9320791>
8. Michaelides, A. and Nicolaou, T. (2017). Starting and running the induction motor with a variable capacitor. *2017 14th International Conference on Engineering of Modern Electric Systems (EMES)*, Oradea, Romania, pp.87-90. doi:<https://doi.org/10.1109/EMES.2017.7980388>

9. Jiang, X., Namokel, M., Hu, C., Tian, R. and Dong, J. (2019). Research on Energy Saving Control of Elevator. *2019 International Conference on Control, Automation and Information Sciences (ICCAIS)*, Chengdu, China, pp.1-5. doi:<https://doi.org/10.1109/ICCAIS46528.2019.9074551>.

10. Zhang, Y. and Dong, J. (2022). Design and Implementation of Energy Saving Elevator Control System based on Single Chip Microcomputer. *2022 IEEE International Conference on Advances in Electrical Engineering and Computer Applications (AEECA)*, Dalian, China, pp.236-240. doi:<https://doi.org/10.1109/AEECA55500.2022.9918820>.

11. Andryushchenko, O., A., Boyko, A., A., Babychuk, O., B. (2010). «Analysis of the energy efficiency of electric drives of passenger elevators» [Analiz energeticheskoy effektivnosti elektroprivodov passajirskih liftov]. *Bulletin of the National Technical University [Visnik nationalnogo tehničnogo universitetu] "KhPI", Kharkiv: [NTU "KhPI"]*, 28, pp.503-504. Available at: <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/20406b87-e2b7-48d6-83ec-b2aca5764247> [Accessed 19 Mar. 2026]

12. Andryushchenko, O. A., Boyko, A. A., Bibik, A. V., Babychuk, O., B. (2012). «Energy indicators for the electric drive of a passenger elevator with a double asynchronous motor» [Energetichni pokazniki elektroprivodu passajirskogo liftu z dvoshvidkislanim asinhronnim dvigunom]. *Electromechanical and energy saving systems [Elektromehanichni s energozberigajuchi sistemi]*, No. 3 (19), Kremenchuk, [KrNU], 205 - 208. Available at: https://ees.kdu.edu.ua/statti/2012_3_205.pdf [Accessed 19 Mar. 2026]

13. Mathew, S., Mogre, P., Chouthai, R., Karandikar, P. B. and Kulkarni, N. R. (2017). Supercapacitor based energy recovery system for an elevator. *2017 International Conference on Advances in Computing, Communication and Control (ICAC3)*, Mumbai, India, pp.2034-2049. doi:<https://doi.org/10.1109/icac3.2017.8318788>

Отримано (Received) 30.09.2025

Отримано після доопрацювання (Received after revision) 18.02.2026

Прийнято (Accepted) 19.03.2026

Опубліковано (Published) 23.04.2026

Energy Analysis of Transient Processes of Asynchronous Elevator Motors

Andrii Boiko¹, *Dr. of Science, Professor*

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0048-9259>; e-mail: a.o.boyko@op.edu.ua;
Scopus Author ID: 57202752287; Websites & social links: <https://op.edu.ua/staff/32211>

Olena Naidenko¹, *Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor*

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5684-5617>; e-mail: avnaidenko@op.edu.ua;
Scopus Author ID: 57362920200

С. М. Заброцький¹, *Postgraduate Student*

ORCID: <http://orcid.org/0009-0008-7899-7150>; e-mail: zabroczkijoo@gmail.com

В. В. Іванов¹, *Postgraduate Student*

ORCID: <http://orcid.org/0009-0002-1820-4418>; e-mail: vadziliyviktorovich@gmail.com

С. А. Малішевський¹, *Postgraduate Student*

ORCID: <http://orcid.org/0009-0005-4477-5048>; e-mail: s.malishevskiy@gmail.com

¹*Odesa Polytechnic National University*

Abstract. *The work the article analyzes the features of the energy of two-speed elevator induction motors in dynamic modes. The operating modes with variable moments of load and inertia, typical for an elevator electric drive, are investigated. It is found that taking into account electromagnetic transient processes significantly affects the energy indicators of starting, braking and reversing, especially under zero initial electromagnetic conditions. It is shown that the formation of control actions allows reducing the duration of transient processes and reducing energy losses. The results provide a scientific basis for the development of control algorithms that ensure high dynamics and energy efficiency of gear elevator winches of traditional design under conditions of changing operating parameters.*

Keywords: *power engineering, elevator induction motor, electric drive, transient processes, thyristor control, initial electromagnetic conditions.*

Article citation: Boyko A. O., Naidenko O. V., Zabrotskyi S. M., Ivanov V. V. and Malishevskiy S. A. (2026). Energy analysis of transient processes of asynchronous elevator motors. *Electrotechnic and Computer Systems*, 45(121), pp. 6-14.
doi:<https://doi.org/10.15276/eltecs.45.121.2026.1>

Про авторів (About the authors)



Бойко Андрій Олександрович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту, Національний університет «Одеська політехніка»; просп. Шевченка, 1, м. Одеса, 65044, Україна.
E-mail: a.o.boyko@op.edu.ua; тел.: +380 48 705 8581

Andrii Boiko, Dr. of Science, Professor, Professor of Department of Electricity and Energy Management, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Ave., Odesa, 65044, Ukraine.
E-mail: a.o.boyko@op.edu.ua; ph.: +380 48 705 8581

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



Найденко Олена Валеріївна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту, Національний університет «Одеська політехніка»; просп. Шевченка, 1, м. Одеса, 65044, Україна.
E - mail: avnaidenko@op.edu.ua, тел.: +380 48 705 7388

Olena Naidenko, Candidate of Technical Sciences, associate professor, associate professor of Department of Electricity and Energy Management, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Ave., Odesa, 65044, Ukraine.
E-mail: avnaidenko@op.edu.ua; ph.: +380 48 705 7388

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



Заброцький Сергій Миколайович, аспірант кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту, Національний університет «Одеська політехніка»; просп. Шевченка, 1, м. Одеса, 65044, Україна.
E-mail: zabroczkijoo@gmail.com; тел.: +380 48 705 8548

Serhii Zabrotskyi, Postgraduate Student of Department of Electricity and Energy Management, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Ave., Odesa, 65044, Ukraine.
E-mail: zabroczkijoo@gmail.com; ph.: +380 48 705 8548

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



Іванов Василь Вікторович, аспірант кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту, Національний університет «Одеська політехніка»; просп. Шевченка, 1, м. Одеса, 65044, Україна. E-mail: vadziliyviktorovich@gmail.com; тел.: +380 48 705 8423

Vasyl Ivanov, Postgraduate Student of Department of Electricity and Energy Management, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Ave., Odesa, 65044, Ukraine.
E-mail: vadziliyviktorovich@gmail.com; ph.: +380 48 705 8423

ORCID: <http://orcid.org/0009-0002-1820-4418>



Малішевський Сергій Анатолійович, аспірант кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту, Національний університет «Одеська політехніка»; просп. Шевченка, 1, м. Одеса, 65044, Україна.
E-mail: s.malishevskiy@gmail.com; тел.: +380 48 705 8423

Serhii Malishevskiy, Postgraduate Student of Department of Electricity and Energy Management, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Ave., Odesa, 65044, Ukraine.
E-mail: s.malishevskiy@gmail.com; ph.: +380 48 705 8423

ORCID: <http://orcid.org/0009-0005-4477-5048>

Multi-agent System of Automatic Control of a Modern Electric Drives in the Age of Industry 4.0

Oleksii S. Shevchuk, *Postgraduate Student*

ORCID: <http://orcid.org/0009-0001-6490-053X>; e-mail: aleksei.shevchuk.ua@stud.op.edu.ua

Odesa Polytechnic National University

Abstract. *Industry 4.0 is characterized by the use of interconnected intelligent systems capable of real-time data exchange, distributed decision-making, and automation. The electric drive is one of the main components for the implementation of rotational and translational motion in complex electromechanical systems, such as Cyber-Physical Systems. Modern technological innovations lead to the increasing penetration of information technologies into various levels of electromechanical systems, including electric drive systems. As research shows, Embedded Computer Systems are widely used in automation systems nowadays. At the same time, the use of Digital Twins makes electric drives an object of simulation and leads to the need for real-time communication to monitor the status of electric drives and optimize their operation. The need for distributed decision-making when performing complex technological processes under conditions of uncertainty of external influences on the system requires a transition from rigidly specified electric drive control logic to adaptive and intelligent control systems. To this end, the current research proposes an intelligent automatic control system for a modern electric drive using a Multi-Agent control model. The proposed approach to developing an automatic control system provides flexibility to the control system in implementing intelligent control algorithms, adaptability to application conditions, and the possibility of continuous optimization using artificial intelligence elements.*

Keywords: *automatic control systems, electric drive, multi-agent system, Industry 4.0, Mechatronics, cyber-physical systems, embedded computer systems.*

Article citation: Shevchuk O. S. (2026). Multi-agent System of Automatic Control of a Modern Electric Drives in the Age of Industry 4.0. *Electrotechnic and Computer Systems*, 45(121), pp.15-21. doi:<https://doi.org/10.15276/eltecs.45.121.2026.2>

Introduction and statement of the research objective

The Industry 4.0 concept is characterized by the integration of information technology into industrial systems for real-time data exchange, distributed decision-making, and automation. The term "Industry 4.0" originated in Germany, but this concept largely overlaps with developments that may be called differently in other countries. According to this concept, everything in and around the production process is digitally connected, ensuring a highly integrated value chain. [1].

The study [2] identifies key technologies of the age of the fourth industrial revolution, which include: Additive Manufacturing, Internet of Things, Artificial Intelligence, Big Data Analysis and Cyber-Physical Systems.

An electric drive is one of the main components for implementing rotational and translational motion in complex electromechanical systems, such

as Cyber-Physical Systems. Modern technological developments lead to the increasing penetration of information technologies into various levels of electromechanical systems, including electric drive systems.

As modern research demonstrates, embedded computer systems have wide application in automation systems. At the same time, the use of digital twins makes electric drives an object of simulation. This leads to the need for real-time communication to monitor the status of electric drives and optimize their operation.

The need for distributed decision-making when performing complex technological processes and operating under conditions of uncertainty of external influences on the system requires a transition from rigidly defined drive control logic to adaptive and intelligent control systems.

All this leads to the integration of edge computing directly into electromechanical systems

including electric drives. This, in turn, expands the computing power of *automatic control systems (ACS)* and leads to new opportunities in building a programmable control algorithm for electric drives.

Therefore, the purpose of the current study is to review the key technologies of the age of the fourth industrial revolution and its impact on the transformation of the modern electric drive. As well as a description of the approach to building an intelligent ACS of a modern electric drive using a multi-agent control model.

The first section, "Analysis of Modern Research," focuses on Cyber-Physical Systems, the Internet of Things, Digital Twins, Edge Computing, and Multi-Agent Systems. These technologies and systems are widely used in Industry 4.0 and are relevant in the context of modern electric drives and ACS.

The second section, "Description of a Modern Electric Drive," examines the evolution of an electric drive from a local electromechanical system to a cyber-physical object within a cyber-physical system.

In the third section, "Multi-agent automatic control system," a model based on agents that embody individual functional aspects of control into a single intelligent system is proposed.

The "Conclusion" section presents the results of the study and raises relevant questions regarding further research directions.

1 Analysis of modern research

The intensive use of information technologies in modern production leads to a narrowing of the gap between the cyber world and the physical world.

Of particular interest is *Cyber-Physical Systems (CPS)*, which are systems that integrate computing and communication components with physical processes, where physical processes influence computing and vice versa. Research [3] demonstrates the role of CPS in promoting the fourth industrial revolution by improving efficiency, flexibility, and management quality. One of the applied elements that make up CPS is embedded computer systems, with various sensors that record physical conditions in real time. The received data is processed by processors and influences the control of actuators through controllers. At the same time, artificial intelligence is widely used to improve real-time monitoring and control of technological processes. One example is the study [4], which analyses artificial intelligence methods for use in selecting the optimal material for manufacturing products in Industry 4.0 conditions.

The study [5] analysed the requirements for industrial CPS in the era of the fourth industrial revo-

lution. These include *Autonomy*, which ensures the functioning of systems within the limits of defined functional goals through *Context-Awareness*. This provides a high degree of *Reliability* regarding *Availability* and system behaviour. In the context of maintaining system functionality under adverse conditions, CPS must be *Robust* and *Resilient* to environmental changes. At the same time, the state of the system must be *Observable* and *Trustworthy* for real-time decision-making. To ensure the *Controllability* of the system, an important requirement is the Predictability of the system, despite its complexity. To respond to changes and new requirements, industrial CPS must be *Scalable* and *Interoperable*. At the same time, all the above requirements must be met taking into account the principle of *Sustainable* development.

The study [6] considers the extension of mechatronic systems to cyber-physical ones, reviews the design methods of such systems, and emphasizes their special role in the manufacturing sector. As emphasized in the study [7], mechatronics, combining elements of electrical, mechanical, electronic and information technologies, plays an important role in the fourth industrial revolution by providing the basis for communication, information processing, actuators and human-machine interaction. The study [8] examines the evolution of mechatronic systems, which are based on physical components, to information-oriented systems, where information is at the center of the system, providing improved interconnectivity, intelligence, and adaptability. In such a paradigm, mechatronic systems act not only as sensors and actuators, they become intelligent objects, with computing and communication capabilities and the ability to process data locally in real time, adapting to environmental conditions.

Technological developments in recent years have given rise to a trend of applying *Internet of Things (IoT)* devices to industrial automation. This helps ensure the cost-effectiveness of technological processes, expands capabilities, and contributes to achieving Industry 4.0 goals and standards. The article [9] investigates the use of a programmable logic controller to create a smart manufacturing platform in accordance with Industry 4.0 standards. The study [10] provides an overview of the use of inexpensive open-source devices, such as Raspberry Pi or Arduino, to extend the functional and communication capabilities of traditional industrial automation technologies to meet the requirements of Industry 4.0 implementation. Examples of the approach to using single-board computers for the development of programmable logic controllers and programmable logic computers are the manufacturers REVOLUTION

PI, Industrial Shields and others [11]. These devices combine the capabilities of classic programmable logic controllers with the operational and software capabilities of personal computers and various communication protocols.

As for condition monitoring, simulation of CPS and its components, in the context of the fourth industrial revolution, *Digital Twins (DT)*, which are a digital representation of an instance of a physical system, have become widely used. A key feature of DT is real-time simulation, which is performed in parallel with the physical system. This allows to detect anomalies and the state of the physical system in real time with high accuracy. This is then the starting point for applying corrective signals to improve accuracy or reduce the impact of the anomaly on the system as a whole. In the article [12], a systematic review of the literature on the development and implementation of DT in various industrial sectors was conducted. The study [13] focuses on the use of DT in the powertrain of electric vehicles, analysing their application and usage scenarios. The research [14] presents a method for assessing the state of an asynchronous electric drive without a speed sensor based on DT and the extended Kalman filter. The results of the study demonstrate higher accuracy in assessing the state of the electric drive compared to models using the ideal inverter model.

The study [15] focuses on the role of *edge computing* in various areas, including energy systems. At its core, edge computing is a paradigm of computing that is performed near the data source. This minimizes latency, reduces data exchange traffic, and increases system autonomy.

With the development of information technology, *multi-agent systems* have become widely used in various industries, including robotics, control systems, and automation. Multi-agent systems are a collection of agents equipped with computing, learning, communication, and execution capabilities. Such a system consists of autonomous entities, that is, agents. These entities can be purely software or with elements or access to artificial intelligence technologies. Agents can work independently of each other or under the direction of another agent. Multi-agent systems can have different organizational structures that determine the communication between them.

The research [16] considers the application of multi-agent systems in smart energy networks. Attention is paid to agent coordination, resource allocation, and system optimization. The study [17] considers the application of a multi-agent reinforcement learning system for the automation and control of water systems.

2 Description of a modern electric drive

In the context of digitalization of production and creation of smart, the evolution of the electric drive from a local electromechanical system to a cyber-physical object as part of the CPS is inevitable.

Let us consider a modern electric drive as a cyber-physical mechatronic system that implements the functions of a mechatronic motion module integrated into a digital production environment, which is hereinafter referred to as *Intelligent Mechatronic Motion Module (IMMM)*. This module is considered as a stand-alone system that can be used individually and in various combinations with other modules. IMMM consists of the following components:

- Mechanical part – motor shaft with gearbox.
- Electrical part – electric motor(s).
- Electronic part – inverter, sensors, power electronics.
- Information part – embedded computer systems, control system algorithms.

At the same time, these components are being expanded by information technologies, namely the Internet of Things, Artificial Intelligence, Big Data Analysis and Cloud Computing. Some of these technologies can be applied directly to the IMMM, while for others the IMMM will act as a data provider and an object of optimization or condition monitoring within the CPS component.

The concept of an Intelligent Mechatronic Motion Module in the age of Industry 4.0 is graphically presented in Figure 1.

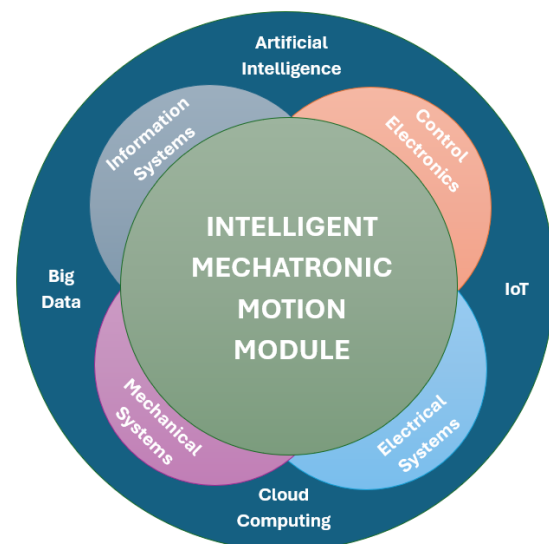


Fig. 1 – Components of an Intelligent Mechatronic Motion Module in the Industry 4.0 paradigm. (Source: compiled by the author)

Table 1 presents the evolution of the electric drive from a local electromechanical system to an IMMM as part of a CPS.

Table 1 – Evolution of the electric drive from a local electromechanical system to an IMMM as part of a CPS (Source: compiled by the author)

Characteristic	Local electromechanical system	IMMM
Architecture	Local	Distributed
Control	Classical methods (PI, PID, etc.)	Adaptive, Intelligent
Scaling	Limited	Modular, flexible
Data	Without accumulation and analysis	Accumulation and analysis
Condition assessment	Minimal	Multichannel, Simulated in real time
Energy efficiency	Fixed	Context-sensitive, capable of optimization
Safety	Functional	Functional, Informational

3. Multi-agent automatic control system

Growing technological requirements for CPS lead to growing requirements for IMMM and its components, including ACS. These requirements can be implemented through optimization and application of new technologies of the hardware and software components of ACS.

Thanks to the introduction of embedded computer systems as part of IMMM, the computing power and interaction interfaces of ACS are expanding. This enables flexible integration of IMMM into CPS, data exchange and continuous optimization, which is a necessary component of achieving energy efficiency and sustainable development.

When implementing energy-efficient programmable solutions in ACS, it is necessary to consider their impact on the accuracy and speed of the system. At the same time, an important component is the stability of this system in conditions of uncertainty, which generates the influence of external factors on this system, which is especially relevant for autonomous robotic systems. In addition to the components of accuracy, speed, energy efficiency, and system stability, an important component is the time spent on developing and implementing optimization or developing the system as a whole. At the same time, using information components in ACS, ensuring system security goes beyond the functional one and is supplemented by the information component. This makes it necessary to take into account functional and information security when developing programmable ACS.

Let's systematize and narrow down the requirements for ACS into five interconnected criteria: speed, accuracy, stability, energy efficiency, and system security. Noting that in our case we are talking about the functional components of the ACS in operation. Therefore, we take that the time for development and implementation does not affect the functionality of this system itself, therefore it is not taken into account.

functionality of this system itself, therefore it is not taken into account.

Let us consider the construction of a programmable ACS for IMMM based on the principle of a multi-agent system. Note that IMMM can consist of one or N-electric motors. From the point of view of the control system, the physical system will be considered as a single system, while the control itself will be multi-criteria in its principle. That is, each agent represents a separate control function and performs local goals, without realizing the overall system goal. In addition to the agents for speed, accuracy, stability, energy efficiency, and system security, a synchronization agent is added to ensure coordination of subsystems. Table 2 lists the agents and their functional roles.

Table 2 – Agents of the ACS and their functionality roles (Source: compiled by the author)

Agent	Functional role
Accuracy	Reducing the control error
Energy efficiency	Energy consumption optimization
Synchronization	Subsystem state coordination
Stability	System response to external disturbances
Speed	Ensuring a given speed
Safety	System anomaly detection

The proposed ACS has a hybrid structure. It includes:

- Decentralized group of target agents (Accuracy, Energy efficiency, Synchronization).
- Centralized system stability agent (Stability).
- Hierarchical execution relationship (Speed).
- Distributed security diagnostics (Safety).

The structural diagram of the hybrid multi-agent ACS is shown in Figure 2.

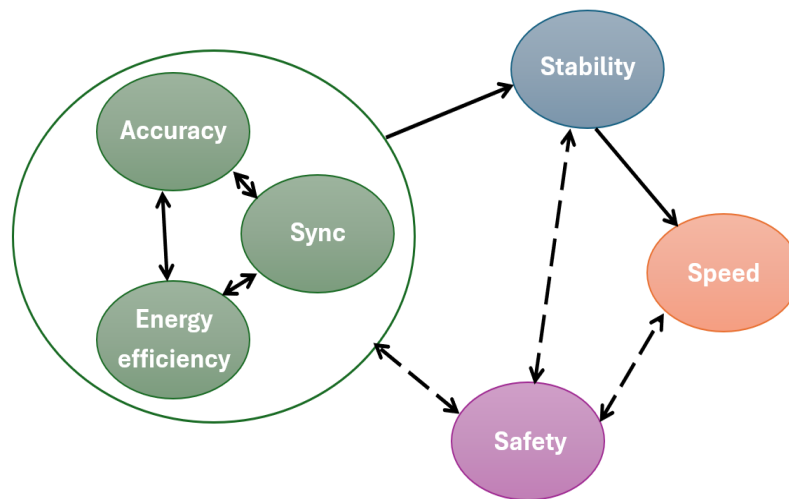


Fig. 2 – Structural diagram of a hybrid multi-agent ACS.
(Source: compiled by the author)

The multi-agent model for constructing an ACS with a multi-motor IMMM is a system that forms, corrects, and limits the control signal depending on the specified criteria. In this case, the final control signal is formed through coordination, provided that the specified stability is observed. At the same time, the criteria can be expanded by introducing additional agents.

The proposed approach to building an ACS gives the control system flexibility in implementing intelligent control algorithms, adaptability to application conditions, and the possibility of continuous optimization through the use of artificial intelligence elements.

Conclusion

The Industry 4.0 paradigm leads to the digitization and expansion of the capabilities of mechatronic systems, including electric drives. This clearly illustrates the vector of development and penetration of information technologies into automatic control systems. Information technology enables the implementation of distributed decision-making using programmable algorithms, machine learning methods, high-level communication, and real-time status monitoring. This provides opportunities for self-improvement of automatic control algorithms and identification of system anomalies.

The result of the current study is a description of the main technologies of the age of the fourth industrial revolution and their impact on electric drives and their ACS. A modern electric drive in the form of IMMM is presented. A model for constructing an ACS based on a multi-agent control system for a multi-engine IMMM is proposed and characterized.

The next stage of the research is the mathematical description of the proposed ACS intellectual model and the implementation of software for conducting the planned physical experiments and mathematical simulation.

Conflicts of interest

The author of this paper declares that there is no conflict of interest regarding this study, including financial, personal, authorial, or any other that could influence the research, as well as the results presented in this paper.

Financing

The research was conducted without financial support.

Data availability

All data are available in numerical or graphical form in the main text of the research.

Using artificial intelligence

The author confirms that he used artificial intelligence technologies to search and review publicly available information. At the same time, the finalized analysis of scientific research, conclusions and writing of the text, creation of figures and tables of this article are the exclusive results of the author's work.

Author's contribution

Oleksii S. Shevchuk: The research, data processing, creation of visualization of results and text, conceptualization and other activities are entirely the work of the author.

References

1. Davies, R. (2015). *Industry 4.0 Digitalization for productivity and growth*. [Online]. Available at: https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2015/568337/EPRS_BRI%282015%29568337_EN.pdf. [Accessed 22 Jan. 2026].
2. Rupp, M., Schneckenburger, M., Merkel, M., Börret, R. and Harrison, D.K. (2021). Industry 4.0: A Technological-Oriented Definition Based on Bibliometric Analysis and Literature Review. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 7(1), p.68. doi:<https://doi.org/10.3390/joitmc7010068>.
3. Mutua, E. (2024). Cyber-Physical Systems and Their Role in Industry 4.0. *Journal of Technology and Systems*, [online] 6(5), pp.57–69. doi: <https://doi.org/10.47941/jts.2149>.
4. Merayo, D., Rodríguez-Prieto, A. and Camacho, A.M. (2019). Comparative analysis of artificial intelligence techniques for material selection applied to manufacturing in Industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 41, pp.42–49. doi:<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.07.027>.
5. Oks, S.J., Jalowski, M., Lechner, M., Mirschberger, S., Merklein, M., Vogel-Heuser, B. and Mösllein, K.M. (2022). Cyber-Physical Systems in the Context of Industry 4.0: A Review Categorization and Outlook. *Information Systems Frontiers*, 26. doi:<https://doi.org/10.1007/s10796-022-10252-x>.
6. Penas, O., Plateaux, R., Patalano, S. and Hammadi, M. (2017). Multi-scale approach from mechatronic to Cyber-Physical Systems for the design of manufacturing systems. *Computers in Industry*, 86, pp.52–69. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compind.2016.12.001>.
7. Afolalu, S.A., Ikumapayi, O.M., Abdulkareem, A., Soetan, S.B., Emeter, M.E. and Ongbali, S.O. (2021). Envisable roles of manufacturing processes in sustainable fourth industrial revolution – A case study of mechatronics. *Materials Today: Proceedings*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.099>.
8. Mutaz Ryalat, Franco, E., Hisham Elmoaqet, Natheer Almtireen and Ghaith Alrefai (2024). The Integration of Advanced Mechatronic Systems into Industry 4.0 for Smart Manufacturing. *Sustainability*, 16(19), pp.8504–8504. doi:<https://doi.org/10.3390/su16198504>.
9. Chen, J.-Y., Tai, K.-C. and Chen, G.-C. (2017). Application of Programmable Logic Controller to Build-up an Intelligent Industry 4.0 Platform. *Procedia CIRP*, 63, pp.150–155. doi:<https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.116>.
10. Folgado, F.J., Calderón, D., González, I. and Calderón, A.J. (2024). Review of Industry 4.0 from the Perspective of Automation and Supervision Systems: Definitions, Architectures and Recent Trends. *Electronics*, [online] 13(4), p.782. doi:<https://doi.org/10.3390/electronics13040782>.
11. Raspberry Pi. (2025). *Success stories - Raspberry Pi*. [online] Available at: <https://www.raspberrypi.com/success-stories/?industry%5B0%5D=industrial-automation> [Accessed 22 Jan. 2026].
12. Fett, M., Wilking, F., Goetz, S., Kirchner, E. and Sandro Wartzack (2023). A Literature Review on the Development and Creation of Digital Twins, Cyber-Physical Systems, and Product-Service Systems. *Sensors*, [online] 23(24), pp.9786–9786. doi:<https://doi.org/10.3390/s23249786>.
13. Li, X., Niu, W. and Tian, H. (2024). Application of Digital Twin in Electric Vehicle Powertrain: A Review. *World Electric Vehicle Journal*, [online] 15(5), p.208. doi:<https://doi.org/10.3390/wevj15050208>.
14. Mohsen Ebadpour, Mohammad (Behdad) Jamshidi, Talla, J., Hamed Hashemi-Dezaki and Peroutka, Z. (2023). Digital Twin Model of Electric Drives Empowered by EKF. *Sensors*, 23(4), pp.2006–2006. doi:<https://doi.org/10.3390/s23042006>.
15. Liang, S., Jin, S. and Chen, Y. (2024). A Review of Edge Computing Technology and Its Applications in Power Systems. *Energies*, [online] 17(13), p.3230. doi:<https://doi.org/10.3390/en17133230>.
16. Yusuf Izmirliloglu, Pham, L., Son, T.C. and Enrico Pontelli (2024). A Survey of Multi-Agent Systems for Smartgrids. *Energies*, [online] 17(15), pp.3620–3620. doi:<https://doi.org/10.3390/en17153620>.
17. Jia, L. and Pei, Y. (2025). Recent Advances in Multi-Agent Reinforcement Learning for Intelligent Automation and Control of Water Environment Systems. *Machines*, 13(6), p.503. doi:<https://doi.org/10.3390/machines13060503>.

Received (Отримано) 19.12.2025

Received after revision (Отримано після доопрацювання) 25.02.2026

Accepted (Прийнято) 26.03.2026

Published (Опубліковано) 23.04.2026

Багатоагентна система автоматичного керування сучасним електроприводом в епоху Індустрії 4.0

О. С. Шевчук, аспірант

ORCID: <http://orcid.org/0009-0001-6490-053X>; e-mail: aleksei.shevchuk.ua@stud.op.edu.ua

Національний університет «Одеська політехніка»

Анотація: Індустрія 4.0 характеризується застосуванням взаємопов'язаних інтелектуальних систем, здатних до обміну даними в режимі реального часу, розподіленого прийняття рішень та автоматизації. Електропривід є одним з основних компонентів для реалізації обертового та поступального руху в складних електромеханічних системах, таких як Кібер-Фізичні Системи. Сучасний розвиток технологій призводить до все більшого проникнення інформаційних технологій на різні рівні електромеханічних систем, в тому числі систем електроприводу. Як демонструють дослідження, вбудовані комп'ютерні системи мають широке застосування в системах автоматизації. В той же час, застосування цифрових двійників робить електроприводи об'єктом моделювання та призводить до необхідності комунікації в режимі реального часу для контролю стану електроприводів та оптимізації їх роботи. Необхідність розподіленого прийняття рішень, при виконанні складних технологічних процесів в умовах невизначеності зовнішніх впливів на систему, вимагає переходу від жорстко заданої логіки керування електроприводом до адаптивної та інтелектуальної систем керування. Для цього в поточному дослідженні пропонується побудова інтелектуальної системи автоматичного керування сучасного електропривода з застосуванням багатоагентної моделі керування. Запропонований підхід в побудові системи автоматичного керування надає гнучкості системі керування в реалізації інтелектуальних алгоритмів керування, адаптивності під умови застосування та можливості безперервної оптимізації завдяки застосуванню елементів штучного інтелекту.

Ключові слова: Системи Автоматичного Керування, Електропривід, Багатоагентна система, Індустрія 4.0, Мехатроніка, Кібер-Фізичні Системи, Вбудовані Комп'ютерні Системи.

Цитування статті: Шевчук О. С. (2026). Багатоагентна система автоматичного керування сучасним електроприводом в епоху Індустрії 4.0. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*, 45(121), с.15-21.
doi:<https://doi.org/10.15276/eltecs.45.121.2026.2>

About the author (Про автора)



Oleksii S. Shevchuk, Postgraduate Student of the Department of Electromechanical Engineering, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Ave., Odesa, 65044, Ukraine.

E-mail: aleksei.shevchuk.ua@stud.op.edu.ua, ph.: +380 50 333 4032

Шевчук Олексій Сергійович, аспірант кафедри електромеханічної інженерії, Національний університет «Одеська політехніка»; просп. Шевченка, 1, м. Одеса, 65044, Україна.

E-mail: aleksei.shevchuk.ua@stud.op.edu.ua; тел.: +380 50 333 4032

ORCID: <http://orcid.org/0009-0001-6490-053X>

Probabilistic Criterion for Evaluation of the Dependability of Critical Electrotechnical Systems

Dmytro Stetsiuk, *Postgraduate Student*

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7013-7219>; e-mail: stetsyk.di@stud.op.edu.ua

Odesa Polytechnic National University

Abstract. *In the paper, a probabilistic methodology for the quantitative evaluation of the dependability of critical electrotechnical systems operating under destructive impacts is proposed. It is shown that traditional reliability and availability indicators are insufficient for describing system conduct under partial degradation, complete loss of operability, and subsequent recovery processes.*

Dependability is interpreted as an integral probabilistic property reflecting a system's ability to retain and restore critical functions under adverse conditions. A state-based Markov model is applied to describe the evolution of the functional state through a finite set of functional states and probabilistic transitions. Within this framework, dependability is characterized by three complementary probabilistic components: retention of full operability under destructive impact, recovery after partial loss of functionality, and recovery after complete loss of operability.

On this basis, a normalized integral dependability criterion bounded within the interval [0;1] is proposed using weighted aggregation of the probability components. The proposed approach provides a rigorous and flexible tool for comparative analysis and evaluation of critical electrotechnical systems with respect to resilience and recoverability.

Keywords: *dependability, dependability indicators, critical electrotechnical systems, Markov processes, state-based modeling, recovery of operability.*

Article citation: Stetsiuk D. V. (2026). Probabilistic criterion for evaluation of the dependability of critical electrotechnical systems. *Electrotechnic and computer systems*, 45(121), pp.22-31. doi:<https://doi.org/10.15276/eltecs.45.121.2026.3>

Introduction

Critical-purpose electrotechnical systems in the twenty-first century have become one of the key foundations of the functioning of modern society. Power supply systems, communication systems, data centers, water and gas supply facilities, transport infrastructure, and medical institutions form an interconnected network, the failure of individual elements of which is capable of causing cascading disruptions in adjacent sectors and leading to severe socio-economic consequences [1], [2]. Under conditions of digitalization and increasing interdependence of infrastructures, even a short-term loss of power supply can result in disproportionately large losses.

Modern electrotechnical systems operate under conditions of a growing number of destructive impacts of various natures. These include natural disasters (hurricanes, floods and earthquakes), technological accidents, as well as anthropogenic factors associated with operational errors and equipment ageing

[3]. In recent decades, targeted destructive impacts characteristic of armed conflicts have acquired particular significance, within which critical infrastructure becomes the object of systematic attacks. The practice of recent years demonstrates that power supply and communications are often regarded as priority targets, since their disruption leads to paralysis of medical, food, municipal, and governance systems.

Traditional approaches to the analysis of electrotechnical systems predominantly rely on the concepts of reliability and fault tolerance, oriented towards random component failures and statistically stationary operating conditions [4]. However, under conditions of targeted and large-scale destructive impacts, such models prove to be insufficient, since they generally do not take into account degradation dynamics, the possibility of partial loss of functionality, and the processes of system recovery after severe damage. In response to these challenges, the scientific literature has actively developed the con-

cepts of robustness and resilience, aimed at analyzing the ability of infrastructures to withstand extreme events and recover after them [5], [6].

Despite significant progress in the field of analyzing the robustness and protection of critical infrastructures, the term “dependability” is increasingly used in engineering and scientific practice, intuitively reflecting the ability of a system to ensure the performance of critically important functions under destructive impacts. At the same time, this term does not have a generally accepted rigorous definition and is not accompanied by a unified set of quantitative indicators that would allow an objective evaluation of the level of dependability of electrotechnical systems. The absence of a formalized and measurable criterion significantly limits the possibilities for analysis, design, and management of such systems, especially in the context of critical infrastructure.

It should be noted that in the absence of a quantitatively defined indicator it is impossible to correctly compare different system architectures, substantiate design decisions, and develop strategies for increasing their resistance to destructive impacts. Thus, the problem of dependability acquires not only theoretical but also applied significance, being directly related to ensuring energy security and the resilience of vital societal functions.

In this regard, the aim of this study is, first, to formalize the concept of dependability with respect to critical electrotechnical systems and, second, to develop a clear, interpretable, and quantitatively measurable criterion that makes it possible to evaluate the ability of a system to retain and restore the performance of its functions under destructive impacts. Achieving this aim requires an analysis of existing approaches to the evaluation of operability and the identification of their methodological limitations, which determines the content of the subsequent sections of the work.

1 State of the Art

In contemporary scientific literature, the concept of “dependability” reflects the ability of a system to provide the required level of service with a predefined degree of confidence, encompassing aspects of reliability, availability, maintainability, safety, and security, as well as mechanisms of failure prevention, fault tolerance, recovery, and disturbance prediction [7]. An important methodological consequence of this approach is that dependability is not reduced to the “probability of failure-free operation” or to a single reliability indicator: it presupposes a multicomponent description of system conduct over time, including functional degradation

and subsequent recovery, as well as consideration of organizational and technological operational loops. For critical electrotechnical systems, this is of particular importance, since their systemic operability is determined not only by equipment failures, but also by the availability of control and communication, the operation of automation, and the capabilities for rapid recovery.

The contemporary literature on power engineering has traditionally developed a set of reliability indicators (SAIDI/SAIFI, ENS/EENS, LOLP/LOLE, etc.) and adequacy and security models, which make it possible to formally evaluate the probability of power supply shortages and the expected duration or frequency of outages. At the same time, when transitioning to the analysis of the dependability of critical systems, two persistent limitations become evident. First, a significant proportion of reliability indicators describe the averaged quality of power supply and do not distinguish levels of functional degradation (complete or partial loss of operability), nor do they consider recovery dynamics as an independent component of dependability. Second, classical metrics prove to be insufficiently sensitive to scenarios of rare but high-impact events (HILF), in which the rate of degradation, the depth of functional loss, and the speed and probability of recovery become decisive [9–12]. For this reason, in recent year, alongside “reliability” approaches, the direction of resilience has been actively developing as a characteristic of a system’s ability to withstand destructive impacts, adapt to them, and recover [9–12], [18], [20], [21]. For the dependability of critical electrotechnical systems, what is fundamental is not the terminological distinction, but the fact that resilience approaches effectively bring back into focus the phase structure of an event: the pre-disturbance state, degradation, the minimum level of functioning, and recovery to normal operation [9], [10], [21].

A significant contribution to the formalization of this phase logic has been made in works proposing temporal metrics of degradation and recovery and emphasizing the need to distinguish between the “infrastructural” and “operational” components of power system response [9]. An important methodological advantage of such approaches is that they facilitate the interpretation of dependability as a probabilistic process of transitions between functional states. At the same time, even advanced resilience metrics often remain oriented towards aggregated integral indicators of losses or recovery time, rather than towards a probabilistic decomposition of dependability by key events of “retention of full functionality / recovery after partial degradation / recovery after complete loss”, that is, they do not

provide a direct measurable criterion that naturally supports a Markov (state-space) interpretation required for further formal analysis.

In review works devoted to resilience metrics, the problem of the absence of a standardized framework is emphasized: there are many metrics, but they are often incomparable, and the choice of an indicator is determined by modeling convenience rather than by the completeness of the description of dependability [11], [12], [21]. This is directly manifested in the fact that a significant proportion of publications focuses on a single dominant axis—for example, expected energy not supplied or recovery time – and thereby lose the distinction between scenarios in which the same “integral damage” is achieved through fundamentally different trajectories of degradation and recovery. For critical infrastructure, where threshold effects and cascading consequences are important, this constitutes a substantial limitation. Thus, even in the presence of a wide spectrum of resilience metrics, there remains a methodological demand for a dependability criterion that would be simultaneously meaningfully interpretable for critical infrastructure and formally measurable through state probabilities and transition probabilities.

An additional dimension of the dependability of modern power systems is associated with their transformation into cyber-physical systems, in which fault tolerance is determined not only by the physical network, but also by monitoring, communication, and control loops. In works devoted to the impact of digitalization, it is emphasized that the integration of information and communication technologies (ICT) increases observability and controllability, but at the same time creates new classes of vulnerabilities and failures capable of reducing systemic dependability [12], [13]. Accordingly, operability criteria that do not take into account failures of measurement, data transmission, and control become methodologically incomplete for critical systems. Review studies on the reliability of cyber-physical layers show that traditional component reliability must be complemented by models of data failures, routing errors, and disruptions in the operation of control centers, since it is precisely these mechanisms that are capable of transferring a system into degraded states without “classical” damage to power equipment [12]. The systematization of policies and models of cyber-physical power systems further fixes the gap between engineering reliability models and the task of comprehensive dependability as a property of a “system of systems” [13].

At the applied level, this is manifested in the development of reliability models of cyber-physical

power systems that take into account random failures of measurement and remote control, which directly leads to the need to describe the system through a set of functional states and probabilistic transitions between them [14]. Similarly, in distribution network problems, schemes are considered in which the reliability of the power component becomes dependent on the characteristics of the communication channel (including modern wireless technologies), and dependability must be evaluated as a result of the joint dynamics of “power engineering + communication” [22]. These works confirm a general conclusion: for critical electrotechnical systems, functional resilience under destructive impacts is determined not by a single indicator, but by a combination of probabilities of transition into different functional states and probabilities of recovery.

In parallel, literature on micro-energy systems and microgrids is developing, where the presence of distributed generation, storage, and islanded modes creates a natural formulation of “full/partial operability” and “recovery/reconfiguration”. It is indicative that in studies where a state-space apparatus is directly applied and cyber failures are taken into account, the formulation almost inevitably shifts to a probabilistic description of degradation and recovery, although the final metrics are often again collapsed into traditional indices [24], [15]. Some works explicitly position the analysis in terms of the dependability of microgrids and use Markov constructions (including extensions such as fuzzy-Markov), which demonstrates the compatibility of Markov logic with the dependability problem [23]. At the same time, the question remains open as to which specific comprehensive measurable dependability indicator should be considered adequate for a critical electrotechnical system – such that it 1) preserves the interpretation of “retention of full functionality” and “recovery from degradation”, 2) can be parameterized through state and transition probabilities, and 3) allows comparison of different strategies for enhancing resilience and recovery.

A number of works attempt to eliminate this gap by extending traditional reliability towards operations and maintenance management, emphasizing that system “availability” is determined not only by design decisions, but also by the life cycle, maintenance policies, risk management, and recovery resources [16]. Such reviews are important for the analysis of dependability, as they reintroduce the temporal component of recovery and organizational constraints into the model. However, they generally do not provide an explicit formal dependability criterion that would be “embedded” in a probabilistic model of the functional states of a critical system.

Similarly, frameworks for measuring the resilience of critical infrastructure in general fix the diversity of existing measurement approaches and the need for comparable metrics, but do not propose a specialized dependability criterion specifically for electrotechnical systems, where the key issue is the preservation of power supply and critical functions under targeted destruction [17].

Contemporary reviews on power system resilience and strategic measures for enhancing resilience directly use the term dependability as one of the target characteristics of resilient infrastructure and emphasize that metrics are needed which support comparison of solutions both in terms of the ability to “withstand” and the ability to “rapidly and with a defined probability recover” [20]. In a similar vein, works aimed at achieving conceptual consensus on resilience emphasize that metrics should reflect not only final damage, but also the process properties of degradation and recovery, since it is precisely these that determine the real dependability of critical systems under HILF events and combined threats [18]. Finally, reviews on the cybersecurity of microgrids directly link resilience and dependability with the need to jointly account for attacks/failures and recovery scenarios, since control resilience becomes a factor in preserving the power supply function for critical loads [25]. For critical energy infrastructure based on renewable energy sources, it is also emphasized that the growing role of such facilities requires a comprehensive view of resilience, network integration, and cyber protection as elements of dependability, rather than as separate “add-ons” to classical reliability [26].

Taken together, the cited sources make it possible to draw a key conclusion for the formulation of the problem addressed in this study: the literature has established a general framework of dependability as a multicomponent system property [7], developed approaches to resilience metrics that introduce degradation and recovery as central elements of evaluation [9–12], [18], [20], [21], and relies on results concerning the cyber-physical nature of power systems and the need to account for failures of measurement, communication, and control [12–15], [22], [25]. At the same time, a methodological gap remains: there is no single, easily interpretable, and measurable comprehensive dependability criterion for a critical electrotechnical system that would be directly expressed through probabilities of functional states and transitions between them (including retention of full operability under impact and probabilities of recovery from partial and complete loss of operability) and would thereby naturally support Markov analysis. Eliminating this gap constitutes the

substantive basis of the research objective and the subsequent development of a formal apparatus for the evaluation of dependability.

Thus, the conducted analysis of contemporary scientific approaches to the evaluation of operability, reliability, robustness, and resilience of critical electrotechnical systems indicates the presence of a substantial methodological gap between the large number of existing indicators and the absence of a single, clearly formalized, and quantitatively measurable dependability criterion that would adequately reflect system behavior under destructive impacts. Existing metrics either focus on averaged indicators of failures and service losses or describe degradation and recovery through integral temporal characteristics that largely depend on the choice of service function and threshold values [9–12], [18], [21]. At the same time, the literature insufficiently represents approaches that would make it possible to directly link dependability with the probabilistic structure of the system’s functional states and the processes of transition between them, in particular taking into account the distinction between retention of full operability under impact and recovery after partial or complete loss of functionality.

In this regard, the further development of the theory of dependability of critical electrotechnical systems requires a clear formalization of the very concept of dependability in terms compatible with the contemporary dependability framework, as well as the definition of requirements for a quantitative indicator capable of reflecting both the states of system functioning and the dynamics of its degradation and recovery under destructive impacts. Such an indicator should be interpretable from an engineering point of view, suitable for comparative analysis of alternative architectures and protection strategies, and formally linked to the probabilistic characteristics of the system, which opens the possibility for the application of rigorous methods of stochastic analysis.

2 Formalization and Justification of the Dependability Criterion for Critical Electrotechnical System

Based on the analysis of contemporary approaches to the evaluation of operability and dependability of critical electrotechnical systems, dependability is appropriately considered as an integral probabilistic characteristic that reflects a system’s ability to retain and restore the performance of its functions in the presence of destructive impacts. Such an interpretation is consistent with the generally accepted dependability framework and makes it possible to move from qualitative descriptions to

quantitative evaluation, which is necessary for comparative analysis of architectures, justification of design decisions, and support of critical infrastructure management [27], [28].

A key modeling assumption of this study is the assumption of the Markovian nature of processes in the system, according to which the evolution of the functional state of an electrotechnical system is described by a Markov process. Within this assumption, it is considered that the probabilities of transitions between states depend only on the current state of the system and do not depend on the prior history of degradation or recovery. This makes it possible to represent system behavior in the form of a finite set of functional states corresponding to different levels of operability, and a matrix of transition probabilities between them, conditioned both by destructive impacts and by recovery processes. The Markov formulation is well established in problems of reliability and dependability analysis of complex technical systems and provides a formally rigorous and at the same time engineering-interpretable description [27], [29].

Within this formulation, dependability cannot be adequately characterized by a single scalar indicator such as the probability of failure-free operation or the availability factor. The behavior of critical electrotechnical systems fundamentally depends on the depth of degradation and the recovery scenario, which necessitates the identification of several complementary components. For this purpose, dependability is proposed to be characterized by three probabilistic components, each of which has a clear physical and engineering interpretation.

The first component reflects the probability of retaining full operability of the system under the action of a destructive impact. For electrotechnical systems, this quantity characterizes the ability of the infrastructure to withstand the impact without transitioning into a degraded state, that is, without losing the ability to provide nominal power supply to critical loads. High values of this probability indicate the effectiveness of structural redundancy, physical and cyber protection, circuit redundancy, and damage localization, which is key to preventing cascading disruptions in interconnected infrastructures [30], [31].

The second component characterizes the probability of restoring full operability after a partial loss of functionality. Partial degradation for electrotechnical systems implies operation in a limited mode, for example with the disconnection of non-critical loads, transition to islanded operation, or the use of backup power sources. This component reflects system adaptability, its reconfiguration capabilities, and

the effectiveness of recovery procedures. For modern distributed power supply systems, it is precisely the ability to return quickly and with high probability to the nominal operating mode after partial disturbances that determines the practical level of dependability [32].

The third component corresponds to the probability of restoring full operability after a complete loss of system functionality, which occurs in cases of large-scale accidents, destruction of key network elements, or loss of centralized control. For critical electrotechnical systems, this property is fundamentally important in view of the need to ensure the long-term provision of vital societal functions even in the event of repeated or combined destructive impacts. It reflects maintainability, resource availability, the effectiveness of emergency recovery strategies, and organizational aspects of operation [33], [34].

All three components are probabilities and, accordingly, take values in the range [0;1]. To form an integral dependability indicator, it is proposed to combine them using weighted aggregation. The composite dependability criterion G is defined as a weighted sum of the corresponding probabilities with non-negative weighting coefficients that satisfy the normalization condition:

$$G = w_1 \cdot P_{Ret} + w_2 \cdot P_{RPL} + w_3 \cdot P_{RFL},$$

where w_1, w_2, w_3 – are weighting coefficients;

P_{Ret} – probability of retention of full operational capability;

P_{RPL} – probability of recovery after partial loss of operational capability;

P_{RFL} – probability of recovery after complete loss of operational capability.

With the imposition of the additional normalization condition:

$$w_1 + w_2 + w_3 = 1$$

the criterion G is a convex combination of probabilities and strictly belongs to the interval [0;1].

The value $G = 0$ corresponds to a system that is incapable of either withstanding destructive impacts or restoring operability after degradation, whereas the value $G=1$ corresponds to an idealized system that retains or fully restores operability in all considered scenarios. In practice, high values of the criterion are characteristic of specially protected systems or distributed power supply systems in which the failure of individual elements does not lead to a loss of operability of the system as a whole [35], [36].

The weighting coefficients in this criterion have a clear physical meaning and reflect the relative importance of different aspects of dependability for

a specific object or operating conditions. Their selection makes it possible to adapt the criterion to the system type, permissible levels of degradation, and recovery priorities without changing the overall structure of the indicator.

Thus, the proposed criterion combines formal rigour, engineering interpretability, and configurationally flexibility, which makes it suitable for further use in stochastic analysis and optimization of critical electrotechnical systems. At the same time, the linear form of aggregation and the Markov assumption define the limits of applicability of the criterion, which should be taken into account when analyzing systems with pronounced memory effects or nonlinear interaction of degradation and recovery processes; these limitations are considered as directions for further development of the proposed approach.

3 Discussion

The proposed composite dependability criterion should be considered in the context of existing metrics that are traditionally used for the evaluation of operability, reliability, and robustness of electrotechnical systems. Such a comparison makes it possible to clearly delineate both the advantages of the proposed approach and its place among existing engineering tools for the analysis of critical infrastructure. Classical reliability indicators, in particular the probability of failure-free operation, mean time to failure, and the availability factor, are widely used for the evaluation of power systems under stationary operating conditions [37]. These metrics are well formalized and have a clear statistical interpretation; however, they are generally based on a binary division of system states into “operable” and “inoperable”. As a result, they reflect neither intermediate levels of degradation nor the distinction between partial and complete loss of functionality, which is fundamentally important for critical electrotechnical systems under destructive impacts.

Power supply quality indices commonly used in power engineering practice, such as SAIDI and SAIFI, are oriented towards evaluating the consequences of failures for consumers and characterize the average duration and frequency of power supply interruptions [38]. Although these indices are useful for regulatory and operational analysis, they are not dependability indicators in the strict sense, since they are not directly linked to the internal structure of the system, do not reflect its ability to recover after large-scale destruction, and do not allow assessment of the impact of alternative architectural solutions.

Resilience metrics proposed in contemporary literature represent a significant step towards accounting for the dynamics of system degradation and recovery [39]. Many of them are based on integral characteristics of the service function over time, in particular on the area under the recovery curve or on the speed of return to the nominal level of functioning. Despite their conceptual attractiveness, such metrics often depend on the choice of threshold values, time horizons, and the form of the service function, which complicates their comparative use and engineering interpretation. In addition, they usually do not distinguish between scenarios of partial and complete loss of operability, combining them into a single degradation indicator.

In contrast to the approaches mentioned above, the proposed dependability criterion is based on an explicit state-based representation of system conduct and on a Markov model of transitions between functional states. This makes it possible to directly link the value of the criterion to physically and engineering-interpretable scenarios of retention of operability and recovery. An important distinction is also that the criterion is not reduced to an averaged indicator of losses or recovery time, but is formed as a weighted combination of probabilities of fundamentally different events, each of which has independent significance for the analysis of dependability.

Compared with multidimensional approaches to the evaluation of dependability, the proposed criterion maintains a balance between completeness of description and practical applicability. On the one hand, it aggregates several aspects of system conduct into a single normalized indicator, which simplifies comparative analysis and optimization. On the other hand, the presence of weighting coefficients makes it possible to adapt the criterion to specific operating conditions, the type of electrotechnical system, and permissible levels of degradation, without losing the transparency of the indicator’s structure.

At the same time, the proposed criterion does not claim to be a universal replacement for all existing metrics and should be regarded as a complement to classical reliability indicators and power supply quality indices for the analysis of dependability under destructive impacts and complex degradation scenarios.

Conclusion

In this paper, the scientific problem of formalization and quantitative evaluation of the dependability of critical electrotechnical systems under destructive impacts is solved. In contrast to traditional

approaches predominantly focused on reliability and availability indicators or average recovery characteristics, the paper proposes a coherent probabilistic concept of dependability that is directly linked to the functional states of the system.

The key scientific novelty of the study lies in the introduction and justification of a composite state-based dependability criterion, which fundamentally differs from existing metrics in that it explicitly distinguishes different levels of system degradation and the corresponding recovery scenarios. The proposed approach does not reduce system behavior to a binary “operable/inoperable” model, but formalizes dependability as a set of probabilistic characteristics reflecting retention of full operability, recovery after partial loss, and recovery after complete loss of functionality. Such a decomposition makes it possible to adequately describe the conduct of critical electrotechnical systems under complex and combined scenarios of destructive impacts.

Another significant element of scientific novelty is the use of a Markov model of functional states as the formal basis for constructing the dependability criterion. Unlike many works in which Markov models are applied only for calculating individual reliability indicators, in this study they are used for the direct determination of the components of the integral criterion. This ensures a rigorous link between the physical interpretation of degradation and recovery processes and the quantitative evaluation of dependability.

The proposed aggregation rule in the form of a weighted normalized combination of probabilities also has methodological novelty. It makes it possible to obtain an integral indicator bounded within the interval $[0;1]$, with a clear interpretation of its limiting values, while simultaneously providing flexibility in adapting the criterion to different classes of electrotechnical systems and operating conditions. The introduction of weighting coefficients transforms the criterion from an abstract theoretical measure into an engineering tool suitable for practical analysis, comparison of architectures, and justification of design decisions.

Comparative analysis with existing reliability metrics, power supply quality indices, and resilience measures has shown that the proposed criterion occupies a distinct niche within the system of indica-

tors used for the evaluation of electrotechnical systems. It complements classical approaches by eliminating their methodological limitations in describing multilevel degradation and recovery, while at the same time avoiding dependence on the subjective choice of time horizons and threshold values inherent in many resilience metrics.

The obtained results form a new conceptual and methodological basis for the quantitative analysis of the dependability of critical electrotechnical systems. The proposed criterion can be used for systematic comparison of alternative architectures, evaluation of the effectiveness of protection and recovery measures, as well as a basic element of stochastic models and optimization problems aimed at enhancing the resilience and recoverability of critical infrastructure. This determines the practical significance and scientific promise of further development of the proposed approach.

Conflicts of interest

The author of this paper declares that there is no conflict of interest regarding this study, including financial, personal, authorial, or any other that could influence the research, as well as the results presented in this paper.

Financing

The research was conducted without financial support.

Data availability

All data are available in numerical or graphical form in the main text of the research.

Using artificial intelligence

The author confirms that he used artificial intelligence technologies only to translate the text of the article into English.

Author's contribution

Dmytro Stetsiuk: The research, data processing, creation of visualization of results and text, conceptualization and other activities are entirely the work of the author.

References

1. Rinaldi, S.M., Peerenboom, J.P. and Kelly, T.K. (2001). Identifying, Understanding, and Analyzing Critical Infrastructure Interdependencies. *IEEE Control Systems*, [online] 21(6), pp.11–25. doi:<https://doi.org/10.1109/37.969131>.

2. Buldyrev, S.V., Parshani, R., Paul, G., Stanley, H.E. and Havlin, S. (2010). Catastrophic cascade of failures in interdependent networks. *Nature*, 464(7291), pp.1025-1028. doi:<https://doi.org/10.1038/nature08932>.
3. Panteli, M.; Mancarella, P. (2015). The Grid: Stronger, bigger, smarter? Presenting a conceptual framework of power system resilience. *IEEE Power and Energy Magazine*, 13(3), pp.56–66. doi:<https://doi.org/10.1109/MPE.2015.2397334>.
4. Laprie, J.C. (1992). Dependability: Basic Concepts and Terminology. *Dependability: Basic Concepts and Terminology*, Springer, Vienna, 5, pp.3–245. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-7091-9170-5_1.
5. Haines, Y.Y. (2009). On the definition of resilience in systems. *Risk Analysis*, 29(4), pp.498–501. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2009.01216.x>
6. Hosseini, S., Barker, K. and Ramirez-Marquez, J.E. (2016). A review of definitions and measures of system resilience. *Reliability Engineering & System Safety*, [online] 145, pp.47–61. doi:<https://doi.org/10.1016/j.res.2015.08.006>.
7. Avizienis, A., Laprie, J.-C., Randell, B. and Landwehr, C. (2004). Basic Concepts and Taxonomy of Dependable and Secure Computing. *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*, 1(1), pp.11–33. doi:<https://doi.org/10.1109/TDSC.2004.2>.
8. Panteli, M. and Mancarella, P. (2015). Influence of extreme weather and climate change on the resilience of power systems: Impacts and possible mitigation strategies. *Electric Power Systems Research*, [online] 127(2), pp.259–270. doi:<https://doi.org/10.1016/j.epsr.2015.06.012>.
9. Panteli, M., Mancarella, P., Trakas, D.N., Kyriakides, E. and Hatziaargyriou, N.D. (2017). Metrics and Quantification of Operational and Infrastructure Resilience in Power Systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 32(6), pp.4732–4742. doi:<https://doi.org/10.1109/TPWRS.2017.2664141>.
10. Panteli, M., Pickering, C., Wilkinson, S., Dawson, R. and Mancarella, P. (2017). Power System Resilience to Extreme Weather: Fragility Modeling, Probabilistic Impact Assessment, and Adaptation Measures. *IEEE Transactions on Power Systems*, 32(5), pp.3747–3757. doi:<https://doi.org/10.1109/TPWRS.2016.2641463>.
11. Raoufi, H. ., Vahidinasab, V. and Mehran, K. (2020). Power Systems Resilience Metrics: A Comprehensive Review of Challenges and Outlook. *Sustainability*, 12(22), p.9698. doi:<https://doi.org/10.3390/su12229698>.
12. Jimada-Ojuolape, B. and Teh, J. (2020). Surveys on the reliability impacts of power system cyber-physical layers. *Sustainable Cities and Society*, 62, pp.102384. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102384>.
13. Wang, Q., Zhang, G. and Wen, F. (2021). A survey on policies, modelling and security of cyber-physical systems in smart grids. *Energy Conversion and Economics*, 2(4), pp.197–211. doi:<https://doi.org/10.1049/enc2.12051>.
14. Zhao, Y., Yang, C., Sun, Y., Ren, H., Cheng, X. and Xie, K. (2021). Reliability Evaluation of Cyber-Physical Power Systems Considering Random Failures in Measurement and Remote Control. *Electric Power Components and Systems*, 49(4–5), pp. 532–546. doi:<https://doi.org/10.1080/15325008.2021.1970288>.
15. Aslani, M., Hashemi-Dezaki, H. and Ketabi, A. (2022). Analytical reliability evaluation method of smart micro-grids considering the cyber failures and information transmission system faults. *IET Renewable Power Generation*, 16(13), pp. 2816-2839. doi:<https://doi.org/10.1049/rpg2.12541>.
16. Alvarez-Alvarado, M.S., Donaldson, D.L., Recalde, A.A., Noriega, H.H., Khan, Z.A., Velasquez, W. and Rodriguez-Gallegos, C.D. (2022). Power System Reliability and Maintenance Evolution: A Critical Review and Future Perspectives. *IEEE Access*, 10, pp.51922–51950. doi:<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3172697>.
17. Sathurshan, M., Saja, A., Thamboo, J., Haraguchi, M. and Navaratnam, S. (2022). Resilience of Critical Infrastructure Systems: A Systematic Literature Review of Measurement Frameworks. *Infrastructures*, 7(5), p.67. doi:<https://doi.org/10.3390/infrastructures7050067>.
18. Sujay Kaloti and Chowdhury, B. (2023). Toward Reaching a Consensus on the Concept of Power System Resilience: Definitions, Assessment Frameworks, and Metrics. *IEEE Access*, 11, pp.81401–81418. doi:<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3300292>.
19. Singh, S., Saket, R.K. and Khan, B. (2023). A comprehensive review of reliability assessment methodologies for grid-connected photovoltaic systems. *IET Renewable Power Generation*, 17(7), pp. 1859–1880. doi:<https://doi.org/10.1049/rpg2.12714>.

20. Mohanty, A., Ramasamy, A.K., Renuga Verayiah, Satabdi Bastia, Sarthak Swaroop Dash, Cuce, E., T.M. Yunus Khan and Elahi, M. (2024). Power system resilience and strategies for a sustainable infrastructure: A review. *Alexandria Engineering Journal*, 105, pp.261–279. doi:<https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.06.092>.
21. Umunnakwe, A., Huang, H., Oikonomou, K. and Davis, K.R. (2021). Quantitative analysis of power systems resilience: Standardization, categorizations, and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 149, p.111252. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111252>.
22. Lu, C., Zheng, S., Dai, X. and Wu, X. (2024). Reliability Assessment of Power Distribution Cyber-Physical Systems Considering the Impact of Wireless Access Networks. *Applied Sciences*, 14(21), p.9974. doi:<https://doi.org/10.3390/app14219974>.
23. Swain, K., Cherukuri, M., Indu Sekhar Samanta, Pati, A., Giri, J., Amrutanshu Panigrahi, Qin, H. and Mallik, S. (2024). Fuzzy Markov model for the reliability analysis of hybrid microgrids. *Frontiers in Computer Science*, 6. doi:<https://doi.org/10.3389/fcomp.2024.1406086>.
24. Aslani, M., Hashemi-Dezaki, H. and Ketabi, A. (2021). Reliability Evaluation of Smart Microgrids Considering Cyber Failures and Disturbances under Various Cyber Network Topologies and Distributed Generation's Scenarios. *Sustainability*, 13(10), p.5695. doi: <https://doi.org/10.3390/su13105695>.
25. Zhang, Z., Turnbull, B. Z., Kermanshahi, S. K., Pota, H., Damiani, E., Yeun, C. Y. and Hu, J. (2025). A survey on resilient microgrid system from cybersecurity perspective. *Applied Soft Computing*, [online] 175, p.113088. doi:<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2025.113088>.
26. Riurean, S., Nicolae-Daniel Fiță, Dragoș Păsculescu and Răzvan Slușariuc (2025). Securing Photovoltaic Systems as Critical Infrastructure: A Multi-Layered Assessment of Risk, Safety, and Cybersecurity. *Sustainability*, [online]17(10), pp.4397–4397. doi:<https://doi.org/10.3390/su17104397>.
27. Avizienis, A., Laprie, J.-C., Randell, B. and Landwehr, C. (2004). Basic Concepts and Taxonomy of Dependable and Secure Computing. *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*, 1(1), pp.11–33. doi:<https://doi.org/10.1109/TDSC.2004.2>.
28. Trivedi, K.S. (2002). *Probability and Statistics with Reliability, Queuing, and Computer Science Applications*, New York: John Wiley & Sons. URL: <https://www.amazon.com/Probability-Statistics-Reliability-Queueing-Applications/dp/0471333417>.
29. Billinton, R. and Allan, R.N. (1996). *Reliability Evaluation of Power Systems*, 2nd ed.; Springer: New York. doi:<https://doi.org/10.1007/978-1-4899-1860-4>.
30. Rinaldi, S.M., Peerenboom, J.P. and Kelly, T.K. (2001) Identifying, Understanding, and Analyzing Critical Infrastructure Interdependencies. *IEEE Control Systems Magazine*, [online] 21(6), pp.11–25. doi:<https://doi.org/10.1109/37.969131>.
31. Panteli, M. and Mancarella, P. (2015). The Grid: Stronger, Bigger, Smarter? Presenting a Conceptual Framework of Power System Resilience. *IEEE Power and Energy Magazine*, 13(3), pp.58–66. doi:<https://doi.org/10.1109/MPE.2015.2397334>.
32. Li, W. (2005). *Risk Assessment of Power Systems: Models, Methods, and Applications*. Wiley-IEEE Press: Hoboken. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/book/5238312>.
33. Limnios, N. and Oprisan, G. (2001). *Semi-Markov Processes and Reliability*. Boston, MA: Birkhäuser: Boston. doi: <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-0161-8>.
34. Hosseini, S., Barker, K. and Ramirez-Marquez, J.E. (2016). A Review of Definitions and Measures of System Resilience. *Reliability Engineering & System Safety*, 145, 47–61. doi:<https://doi.org/10.1016/j.res.2015.08.006>.
35. Buldyrev, S.V., Parshani, R., Paul, G., Stanley, H.E. and Havlin, S. (2010). Catastrophic Cascade of Failures in Interdependent Networks. *Nature*, 464(7291), pp.1025–1028. doi:<https://doi.org/10.1038/nature08932>.
36. Wang, Y., Chen, C., Wang, J. and Baldick, R. (2016). Research on Resilience of Power Systems Under Natural Disasters—A Review. *IEEE Transactions on Power Systems*, 31(2), pp.1604–1613. doi: <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2015.2429656>.
37. Kishor Shridharbhai Trivedi and Bobbio, A. (2017). *Reliability and Availability Engineering: Modeling, Analysis, and Applications*. Cambridge, United Kingdom ; New York, Ny: Cambridge University Press. URL: <https://www.amazon.com/Reliability-Availability-Engineering-Modeling-Applications/dp/1107099501>.
38. IEEE Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices. (2012). doi:<https://doi.org/10.1109/ieeestd.2012.6209381>.

39. Ouyang, M., Dueñas-Osorio, L. and Min, X. (2012). Three-Stage Resilience Analysis Framework for Urban Infrastructure Systems. *Structural Safety*, 36–37, pp.23–31. doi:<https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2011.12.004>.

Received (Отримано) 16.12.2025

Received after revision (Отримано після доопрацювання) 24.02.2026

Accepted (Прийнято) 25.03.2026

Published (Опубліковано) 23.04.2026

Ймовірнісний критерій оцінювання гарантоздатності критичних електротехнічних систем

Д. В. Стецюк, аспірант

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7013-7219>; e-mail: stetsyk.di@stud.op.edu.ua

Національний університет «Одеська політехніка»

Анотація. В статті розглядається проблема формалізації та кількісного оцінювання гарантоздатності критичних електротехнічних систем, що функціонують в умовах деструктивних впливів. З огляду на зростаючу вразливість сучасної енергетичної інфраструктури до природних, техногенних і цілеспрямованих руйнівних подій показано, що традиційні показники, засновані на надійності та готовності, є недостатніми для адекватного опису поведінки системи за умов часткової деградації, повної втрати функціональності та подальших процесів відновлення.

Гарантоздатність запропоновано інтерпретувати як інтегральну ймовірнісну властивість, що відображає здатність системи зберігати та відновлювати виконання своїх критично важливих функцій у несприятливих умовах. Застосовано state-based підхід, у межах якого еволюція функціонального стану системи моделюється Марковським процесом на скінченній множині функціональних станів. У цій постановці гарантоздатність характеризується трьома ймовірнісними складовими: ймовірністю збереження повної працездатності за дії деструктивного впливу, ймовірністю відновлення після часткової втрати працездатності та ймовірністю відновлення після повної втрати працездатності.

Інтегральний критерій гарантоздатності запропоновано шляхом агрегування зазначених складових за допомогою зваженої нормованої лінійної комбінації, що забезпечує обмеженість отриманого показника інтервалом $[0;1]$ і чітку інженерну інтерпретацію його граничних значень. Уведення вагових коефіцієнтів забезпечує гнучкість критерію, дозволяючи адаптувати його до різних класів електротехнічних систем, експлуатаційних пріоритетів і допустимих рівнів деградації без зміни формальної структури показника.

Ключові слова: гарантоздатність, показники гарантоздатності, критичні електротехнічні системи, Марковські процеси, state-based моделювання, відновлення працездатності.

Цитування статті: Стецюк Д. В. (2026). Ймовірнісний критерій оцінювання гарантоздатності критичних електротехнічних систем. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*, 45(121), с.22-31. doi:<https://doi.org/10.15276/eltecs.45.121.2026.3>

About the author (Про автора)



Стецюк Дмитро Валерійович, аспірант кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту, Національний університет «Одеська політехніка»; просп. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна. E-mail: stetsyk.di@stud.op.edu.ua, тел.: +380 48 705 8680

Dmytro Stetsiuk, Postgraduate Student of the Department of Power Supply and Power Consumption Management, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Ave., Odesa, 65044, Ukraine. E-mail: stetsyk.di@stud.op.edu.ua, ph.: +380 48 705 8680

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7013-7219>

A Method for Reconstructing Transient Process Parameters in Critical Infrastructure Security Applications

D. A. Maevsky ¹, Dr. of Science, Professor

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0666-6199>; e-mail: Dmitry.A.Maevsky@op.edu.ua;
Scopus Author ID: 55887026000

O. J. Maevskaya ¹, Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6297-4255>; e-mail: e.j.maevskaya@op.edu.ua

V. V. Kvitchuk ¹, Postgraduate Student

ORCID: <http://orcid.org/0009-0009-3989-6493>; e-mail: kvithuk7@stud.op.edu.ua

V. O. Lavrynenko ¹, Postgraduate Student

ORCID: <http://orcid.org/0009-0005-5173-050X>; e-mail: lavrviach@stud.op.edu.ua

¹Національний університет «Одеська політехніка»

Abstract. This paper addresses the reconstruction of transient process parameters from their oscillograms in the context of critical infrastructure security. It is shown that under real operating conditions the only available information on the dynamic state of electrical systems is often limited to recorded oscillograms, while the parameters of circuit elements may be unknown or vary over time. An engineering-oriented method for determining transient process parameters in first- and second-order circuits is proposed. The method is based on separating the forced and natural responses, forming a time series of the natural response, and subsequently estimating its parameters using logarithmic transformations, the least squares method, and numerical approximation techniques. The method is implemented as specialized software developed in Microsoft Excel using VBA. Numerical testing on a first-order circuit example demonstrated exact parameter recovery for noise-free oscillograms and maintained an accuracy of approximately 1% in the presence of disturbances simulating measurement errors. The obtained results confirm the practical applicability of the proposed approach for non-destructive testing, diagnostics, and improving the security of critical technical systems.

Keywords: transient process, oscillogram, natural response, forced response, least squares method, critical infrastructures, security, VBA programming, Microsoft Excel, programmable logic controllers.

Article citation: Maevsky D. A., Maevskaya O. J., Kvitchuk V. V. and Lavrynenko V. O (2026). A method for reconstructing transient process parameters in critical infrastructure security applications. *Electrotechnic and computer systems*, 45(121), pp.32-43. doi:<https://doi.org/10.15276/eltecs.45.121.2026.4>

Introduction

Ensuring the security of critical infrastructures largely depends on the ability to timely detect degradation processes, anomalies, and hidden defects in technical systems under conditions of limited access to equipment. Under real operating conditions, the parameters of elements in electrical circuits and systems are often unknown or vary due to aging, temperature effects, or damage, while the only available information consists of oscillograms of transient processes recorded by measurement and data acquisition devices. This circumstance has led to the

formation of a broad research direction in the scientific literature devoted to reconstructing transient process parameters directly from oscillograms, without constructing a complete physical model of the object, which confirms both the practical significance and the complexity of this problem [1], [3].

In electric power engineering, oscillograms of transient processes following disturbances represent a primary source of information for assessing dynamic stability and analyzing the security of operating modes. Classical and recent studies demonstrate that the parameters of oscillatory and aperiodic

components reconstructed from oscillograms are directly related to power system stability and are used to prevent the development of hazardous operating conditions [1], [2], [5]. At the same time, it is emphasized that real oscillograms contain noise, distortions, and are limited in duration, which complicates reliable parameter estimation and necessitates the development of specialized reconstruction methods specifically oriented toward practical operating conditions [2], [5].

A similar problem is characteristic of transmission lines and distribution networks, where oscillograms of voltages and currents during fault conditions are used to estimate line parameters, localize faults, and analyze failure causes. Studies devoted to parameter reconstruction of lines from fault oscillograms show that such information is critical for improving network reliability and security, since the actual line parameters at the moment of a fault are generally inaccessible by other means [8], [9]. In industrial systems and electric drives, oscillograms of start-up transient processes are used to reconstruct parameters of electrical machines without dismantling them, which is of direct importance for safe operation and equipment diagnostics [6], [7].

In automation and telemechanic systems, particularly within Smart Grid and PMU-oriented monitoring frameworks, oscillograms of transient processes form the basis for real-time condition assessment and detection of hazardous deviations in operating modes. Review studies indicate that modern modal identification algorithms are specifically oriented toward oscillogram analysis, as these data are available in real time and can be used for security-related decision-making [3], [5]. Furthermore, parameters reconstructed from oscillograms are considered informative features for anomaly detection in cyber-physical systems, thereby extending their role in comprehensive critical infrastructure security tasks [15].

From the perspective of non-destructive testing, the analysis of transient process oscillograms represents a typical non-invasive approach to assessing the technical condition of objects. Review works on non-destructive testing emphasize that modern condition monitoring methods are based on reconstructing parametric characteristics of systems from measured signals without interfering with equipment design [11]. This is confirmed by the application of frequency- and time-domain diagnostic methods for transformers, such as SFRA [12], as well as Time Domain Reflectometry techniques for cable networks, where the oscillogram of the reflected signal is used to detect defects [4], [13]. Taken together, these studies demonstrate that the ability to reconstruct transient process parameters from oscillo-

grams is a key component of non-destructive testing and contributes to improving the security of critical infrastructures by enabling early detection of potentially hazardous states and reducing the risk of sudden failures.

Reconstruction of transient process parameters from oscillograms is also important for industrial controllers, including programmable logic controllers (PLCs), distributed control systems (DCS), and embedded control modules used at critical infrastructure facilities. During switching operations, fault conditions, load changes, or cyber-physical disturbances, industrial controllers typically record only time-domain responses of voltages, currents, or internal control signals, while information about object parameters or internal states may be unavailable. Analysis of such transient processes makes it possible to indirectly determine dynamic characteristics of controlled objects, such as effective time constants, damping factors, and dominant modes, without interfering with normal system operation. This makes transient parameter reconstruction an effective tool for non-destructive diagnostics, verification of controller settings, and early detection of degradation or abnormal behavior in industrial automation systems. In security-related applications, these capabilities enhance the resilience and reliability of control systems by enabling assessment of their dynamic state based on recorded oscillograms.

Thus, reconstruction of transient process parameters in devices and systems of critical infrastructures is an actual problem. The aim of this paper is to develop engineering methods for reconstructing transient process parameters from their oscillograms.

1 State of the Art

In contemporary research, the problem of reconstructing transient process parameters from oscillograms is considered as part of a broader challenge of analyzing the dynamic state of technical systems under conditions of incomplete information about their parameters and structure. For critical infrastructures, this formulation is of fundamental importance, since under real operating conditions oscillograms obtained from event recorders, digital measuring devices, or embedded monitoring systems are often the only available source of information about system behavior during transient and emergency regimes. At the same time, element parameters may be unknown, vary over time, or differ from nominal values, which makes the direct application of classical model-oriented approaches for security assessment impractical.

One of the modern directions for addressing this problem is the application of compressed sensing methods, in which a transient process is interpreted as a signal having a sparse representation in a certain basis (exponential, harmonic, or combined). It has been shown that due to this property it is possible to reconstruct parameters of harmonic and transient components even with a limited number of oscillogram samples or in the presence of significant noise [16]. For critical infrastructure security tasks, this is an important advantage, as it enables processing of short or partially lost oscillograms that are typical for emergency events. At the same time, the practical implementation of compressed sensing methods in security monitoring systems is limited by high computational complexity, the need to select an appropriate basis, and the lack of guaranteed reproducibility of results under varying measurement conditions.

Another approach aimed at improving the reliability of transient parameter reconstruction from oscillograms involves explicitly accounting for the properties of the measurement system. Studies devoted to the identification and compensation of frequency and nonlinear characteristics of sensor chains in broadband transient measurements demonstrate that a significant portion of reconstruction errors is caused precisely by distortions introduced by the measurement path [17]. Compensation of these distortions makes it possible to substantially increase the accuracy of estimating damping factors, frequencies, and amplitudes from oscillograms. From the standpoint of critical infrastructure security, this approach is of particular importance, since incorrect interpretation of oscillograms may lead to erroneous conclusions regarding system stability or technical condition. However, the need for detailed calibration of the measurement system and the availability of additional information about its parameters complicate the application of this approach in field conditions and during crisis situations.

For the analysis of complex, nonstationary, and nonlinear transient processes, adaptive signal decomposition methods are widely used, including the Hilbert–Huang Transform and related empirical mode decomposition algorithms. These methods allow an oscillogram to be decomposed into a set of intrinsic mode functions, each characterized by its own instantaneous frequency and amplitude [18]. Such an approach is attractive for critical infrastructure security applications because it does not require assumptions about linearity or stationarity and can be applied to real emergency oscillograms with rapidly changing structures. At the same time, the decomposition results strongly depend on algorithm

parameters and oscillogram quality, and the absence of unified criteria for selecting modal components complicates the use of the obtained parameters as formalized security indicators.

A separate group of methods comprises automatic detection of disturbance onset moments and reconstruction of step changes in transient oscillograms. These approaches are used to accurately determine the start of an event, which is critically important for correct reconstruction of transient parameters and subsequent analysis of incident causes [19]. In the context of critical infrastructure security, such methods enhance the reliability of post-event analysis and localization of hazardous events. Their limitations are related to sensitivity to noise and measurement artifacts, which may lead to incorrect detection of disturbance onset and, consequently, to biased estimates of transient process parameters.

An important direction directly related to non-destructive testing is represented by methods for reconstructing transient processes from indirect measurements, in particular estimating currents from voltage oscillograms. Such approaches make it possible to recover hidden dynamic parameters of a system without installing additional sensors, thereby reducing the invasiveness of monitoring and increasing the reliability of operation of critical facilities [20]. For security applications, this constitutes a significant advantage, as it expands the informational basis for analysis without physical intervention in the system. At the same time, these methods usually rely on physical models and computationally intensive processing algorithms, which limits their applicability in real-time regimes.

Finally, theoretical and applied studies of transient processes in power supply systems demonstrate that a substantial portion of hazardous operating conditions is associated with transient currents in the medium-frequency range, whose parameters are difficult to determine using standard analysis methods [21]. Oscillograms of such processes contain information that is critically important for assessing electromagnetic compatibility, reliability, and equipment security. Nevertheless, existing methods are often oriented toward specialized scenarios and do not provide a unified engineering toolkit for systematic reconstruction of transient process parameters from oscillograms.

Thus, the analysis of contemporary studies shows that existing approaches to reconstructing transient process parameters from oscillograms cover a wide range of methods – from optimization-based and time-frequency techniques to adaptive and model-oriented approaches. However, for critical infrastructure security applications they share com

mon limitations related to sensitivity to noise, complexity of tuning, dependence on oscillogram quality, and insufficient unification of procedures. This substantiates the need for the methods proposed in this paper, which are aimed at robust, reproducible, and engineering-oriented reconstruction of transient process parameters from oscillograms, taking into account the requirements of non-destructive testing and the assurance of critical infrastructure security.

2 Characteristics of Transient Process

Determination of transient process parameters based on oscillograms has a number of fundamental features that directly affect the accuracy and reliability of the obtained results and therefore must be taken into account in engineering analysis and in the assessment of technical system security. By its nature, an oscillogram represents a graphical or discretized depiction of a continuous process, in which the values of the measured quantity and time are presented with limited resolution along the x- and y-axes. This implies that any transient process parameters identified from an oscillogram are inherently approximate, since the source data consist not of exact instantaneous values but of discrete samples or visually read estimates.

Limited resolution along the time axis leads to errors in determining characteristic moments of the transient process, such as the disturbance onset, rise time, oscillation period, or decay time. Even when digital oscillograms are used, time quantization errors are governed by the sampling frequency and synchronization algorithms, while analysis of graphical oscillograms additionally introduces errors associated with visual reading and scaling. As a result, parameters related to time derivatives, frequencies, or roots of the characteristic equation are particularly sensitive to inaccuracies along the x-axis, which may cause systematic bias in the estimated damping factors or natural frequencies.

Similar limitations apply to the y-axis, which corresponds to the amplitude of voltage or current. A real oscillogram represents signal values with limited vertical resolution determined by the bit depth of the analog-to-digital converter or by the accuracy of graphical rendering. This leads to errors in determining initial conditions, integration constants, and amplitudes of both forced and natural components of the transient process. These effects become especially pronounced at low signal levels, where the relative measurement error increases, or under saturation of the measurement chain, which distorts the oscillogram shape at peak values.

A further important feature is that an oscillogram typically contains a superposition of forced

and natural responses, as well as noise and parasitic disturbances. Under conditions of limited accuracy along the x- and y-axes, this complicates correct separation of the components, since even small errors in estimating the steady-state level or the parameters of sinusoidal excitation may lead to significant errors in reconstructing the natural response. Consequently, measurement errors tend not only to propagate into the identification results but also to accumulate and mutually reinforce each other during mathematical processing of oscillograms.

Another characteristic feature is the dependence of parameter estimation accuracy on the selected segment of the oscillogram. In real transient processes, the initial segments often contain steep fronts with large derivatives, where the influence of quantization and noise is maximal, whereas at later stages the signal may approach the noise floor. This creates a trade-off between using an informative but noisy part of the oscillogram and a cleaner but less informative segment. The choice of the analysis interval under such conditions directly affects the stability and reproducibility of the estimated transient parameters.

An additional important aspect is the influence of oscillogram scaling and a priori assumptions regarding the system order and the type of excitation. Since an oscillogram does not contain direct information about the structure of the electrical circuit, any parameter reconstruction is performed within the framework of a chosen mathematical model. Given the limited accuracy of the input data, oscillogram errors may mask a mismatch between the adopted model and the real object, which complicates the physical interpretation of the identified parameters.

Thus, determination of transient process parameters from oscillograms always represents an inverse and ill-conditioned problem, in which the accuracy of the results strongly depends on the resolution and quality of the oscillogram along the x- and y-axes, the noise level, the correctness of component separation, and the adequacy of the adopted model.

At the same time, modern digital oscilloscopes provide not only on-screen visualization of oscillograms but also the ability to store transient processes in the form of time series suitable for further numerical analysis. For example, Tektronix TBS2000B series oscilloscopes support saving oscillograms in SPREADSHEET/CSV format to a USB device, enabling acquisition of a discrete time series of the transient process [22]. Similar functionality is described in the documentation of SIGLENT SDS1000X-E series oscilloscopes, which explicitly indicates the possibility of saving waveforms in

CSV files for subsequent off-instrument processing [23]. RIGOL DS1000Z series oscilloscopes also support saving oscillograms in CSV format, which is a standard tool for transferring data into the Excel environment [24].

Awareness of these features is a necessary condition for the correct application of identification methods in engineering practice, especially in tasks related to reliability analysis and the security of complex technical systems and critical infrastructures.

3 Method for Determining Transient Process Parameters

Let the oscillogram of a transient process be represented as a time series of discrete points. $\{t_i, a(t_i)\}, i = 1, \dots, N$, where t – time instants, $a(t)$ – the measured quantity (voltage or current). In a linear system, the total process is represented as the sum of the forced component $a_f(t)$ and the natural component $a_n(t)$:

$$a(t) = a_f(t) + a_n(t).$$

Subsequently, the parameter identification procedure is expediently organized into three sequential steps: first, the forced component $a_f(t)$ is estimated from the oscillogram; next, the time series $a_n(t)$ is numerically formed as the difference between the total process and the estimated forced component; finally, the parameters of the natural component are determined with explicit consideration of errors in the discrete data.

Determination of the parameters of the forced component under constant excitation is based on the fact that in the steady state $a_f(t)$ is a constant value, that is,

$$a_f(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} a(t).$$

In practice, $a_f(t)$ is estimated from the final segment of the oscillogram, where the exponential natural component has already decayed to a level comparable with the noise floor and the signal fluctuates around a steady value. To improve robustness with respect to noise and quantization along the amplitude axis it is advisable to apply averaging over the interval $[t_k, t_N]$ where t_k is chosen such that the process is visually close to the steady state:

$$a_f(t) = \frac{1}{N - k + 1} \cdot \sum_{i=k}^N a(t_i).$$

In this expression, N – denotes the total number of discrete samples (data points) of the time series obtained from the oscillogram.

Under sinusoidal excitation, the forced component in the steady state is harmonic and can be expressed as:

$$a_f(t) = A_f \cdot \sin(\omega t + \psi_f),$$

where ω is known from the excitation conditions (or can be determined from the oscillogram based on the period T), while the amplitude A_f and the phase ψ_f are estimated from the steady-state portion of the oscillogram. The amplitude A_f is determined from the peak values in the steady-state oscillation interval, for example as one half of the difference between the averaged estimates of the upper and lower extrema over several periods. The initial phase ψ_f is conveniently determined from the time shift Δt between the instant at which the signal crosses zero (or another fixed phase reference) and the corresponding instant of the sinusoidal excitation, that is, $\psi_f = \omega \cdot \Delta t$. To reduce the error in determining t it is advisable to apply interpolation between two adjacent discrete samples between which the zero crossing occurs. In cases where the oscillogram contains noise or a significant natural component, estimation of A_f and ψ_f should be performed on a segment sufficiently far from the switching instant, where the influence of the natural component is minimal, since any error in estimating the forced component directly propagates into the error of the reconstructed natural component.

After estimating the parameters of the forced component, the natural component is numerically isolated as the difference between the total signal and the reconstructed forced component evaluated at the same time instants. The resulting time series $\{t_i, a(t_i)\}$ serves as the basis for determining the parameters of the natural component. It is important to emphasize that errors in discrete time (limited sampling frequency, trigger or synchronization inaccuracies, rounding during data export) as well as amplitude errors (ADC quantization, noise, scale error, and nonlinearity of the measurement chain) introduce uncertainties into the values of the natural component. Therefore, the parameters of the natural component are not determined from individual data points but are obtained as the result of approximating a model to the entire data interval, which makes it possible to reduce the influence of random errors.

For a first-order circuit, the natural component has an exponential form:

$$a_n(t) = A \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (1)$$

where A – is the integration constant and τ – is the time constant of the transient process.

For discrete values of $a_n(t)$ the model is linearized by logarithmic transformation (1):

$$\ln|a_n(t_i)| = \ln|A| - \frac{t_i}{\tau}$$

By introducing $z_i = \ln|a_n(t_i)|$, a linear regression model is obtained

$$z_i \approx \alpha + p \cdot t_i,$$

where $\alpha = \ln|A|$, and $p = 1/\tau$ – is the root of the characteristic equation of the circuit.

Estimation of α and p can be performed using the least squares method, which ensures physically consistent linearization. Once α and p , are obtained, the exponential parameters are determined as

$$\tau = \frac{1}{p}, A = \pm e^\alpha,$$

with the sign of the integration constant chosen to be consistent with the sign of the natural component in the initial segment of the process.

This procedure is more robust than determining the time constant using a tangent-based method, since it averages random errors along the amplitude axis and partially compensates for time-axis errors by exploiting the entire set of samples.

For a second-order circuit, the natural component in the general case is represented either as the sum of two exponentials (for the aperiodic regime) or as exponentially damped oscillations (for the oscillatory regime). In the aperiodic case,

$$a_n(t) = A_1 \cdot e^{p_1 t} + A_{21} \cdot e^{p_2 t}$$

and direct logarithmic transformation no longer yields a linear relationship. Therefore, in this case the parameters of the natural component are determined numerically as a nonlinear approximation problem by minimizing the squared residual between the measured and model-predicted values. From a practical standpoint, it is expedient to employ iterative nonlinear least squares algorithms, such as the Gauss–Newton or Levenberg–Marquardt methods, in which the parameters are updated at each iteration based on linearization of the model around the current estimate.

Thus, the practical procedure for identifying transient process parameters from an oscillogram consists of sequentially reconstructing the steady-state parameters from the steady portion of the record (a constant level for DC excitation or harmonic parameters for sinusoidal excitation), forming the time series $a_n(t)$ as the difference between the measured signal and the reconstructed forced component, and subsequently determining the parameters of the natural component with explicit consideration of errors

in the discrete data. For first-order systems, this can be efficiently implemented via logarithmic transformation of the exponential response followed by linear approximation, whereas for second-order systems, represented by a sum of exponentials or damped oscillations, numerical methods of nonlinear parametric identification are required to consistently fit the model to the oscillogram under measurement uncertainties. the model to the oscillogram under measurement uncertainties.

4 Practical Implementation of the Method

For the practical implementation of the method for determining transient process parameters from their oscillograms, specialized software was developed in the Microsoft Excel environment using the VBA programming language. The choice of Microsoft Excel as the implementation platform is justified by a combination of accessibility, functional adequacy, and engineering convenience. Modern digital oscilloscopes directly export oscillograms in CSV or XLSX formats, which makes it possible to work with time series data in Excel without additional data conversion. Built-in spreadsheet tools, graphical visualization capabilities, and standard mathematical functions provide clear verification of each stage of oscillogram processing, which is critically important for engineering interpretation of the results. The use of VBA enables automation of parameter estimation algorithms, implementation of the least squares method, and numerical approximation techniques without relying on external software packages, while preserving transparency and reproducibility of the computations. In addition, Excel is a widely adopted standard in measurement and operational practice, which facilitates the integration of the developed software into tasks of analysis, diagnostics, and security assessment of critical technical systems without the need for specialized proprietary software. The appearance of the Microsoft Excel worksheet is shown in Fig. 1.

The software is designed for engineering analysis of experimental time series and operates directly on oscillograms represented in tabular form, which ensures straightforward integration with measurement results obtained from modern digital oscilloscopes.

The input data consist of columns containing the time series, including time instants and the corresponding values of the investigated process. The number of samples is not fixed in advance and is automatically determined based on the actual number of populated cells, which allows the software to handle both short and long oscillograms without prior data preprocessing. This eliminates the need

for manual specification of array sizes and reduces the risk of errors during the processing of experimental data.

The type of the forced component of the transient process is specified by the user via interface control elements. A choice between a constant and a sinusoidal forced component is provided through.

The software is designed for engineering analysis of experimental time series and operates directly on oscillograms represented in tabular form, which ensures straightforward integration with measurement results obtained from modern digital oscilloscopes.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Calculation of the parameters of the free component of the first-order transient process								
2									
3	Complete values of the transition process		Parameters of the forced component <input checked="" type="radio"/> Constant <input type="radio"/> Sinusoidal			Parameters of the free component			
4	t	a(t)	Amplitude	Ang. frequency	Initial phase	A	p		
5	0	10	0	0	0	10,06866765	-1011,16468		
6	0,0005	6							
7	0,001	3,5							
8	0,0015	2,3							
9	0,002	1,3							
10	0,0025	0,8							
11	0,003	0,5							
12	0,0035	0,25							
13	0,004	0,3							
14	0,0045	0,08							
15	0,005	0,06							
16	Calculate parameters								

Fig. 1 - Software for determining the parameters of transient processes

The input data consist of columns containing the time series, including time instants and the corresponding values of the investigated process. The number of samples is not fixed in advance and is automatically determined based on the actual number of populated cells, which allows the software to handle both short and long oscillograms without prior data preprocessing. This eliminates the need for manual specification of array sizes and reduces the risk of errors during the processing of experimental data.

Radio Button controls. In the case of constant excitation, the forced component is interpreted as a steady-state level, whereas under sinusoidal excitation it is represented by a harmonic function with known excitation parameters. This approach ensures consistency between the oscillogram processing algorithm and the physical nature of the investigated process.

After selecting the type of the forced component and preparing the input data, the user initiates the computation by pressing the “Calculate” button. In response, the program automatically executes all stages of the algorithm: it estimates the parameters of the forced component from the oscillogram, numerically isolates the natural component as the difference between the total signal and the reconstruct-

ed forced component, and determines the parameters of the natural component based on its time series.

For this purpose, logarithmic transformations and the least squares method are applied for first-order circuits, while numerical approximation procedures are used for more complex models, ensuring robustness of the results with respect to discretization errors and measurement noise.

The program outputs numerical values of the integration constant and the characteristic equation root, which describe the dynamic properties of the circuit or system and can be used for analysis, diagnostics, or security assessment. The interface supports English and Ukrainian languages, and the software provides a transparent and reproducible implementation of the method, combining the clarity of the Excel environment with automated numerical processing for real experimental data.

To verify the proposed method for determining transient process parameters from their oscillograms, numerical testing was performed using a first-order electrical circuit as an example. A circuit implemented in the Multisim environment was used as a reference model, which made it possible to obtain an oscillogram of the transient process with a priori known circuit element parameters and, consequently, with precisely known theoretical values of the

transient process parameters. The circuit used for the study is shown in Fig. 2.

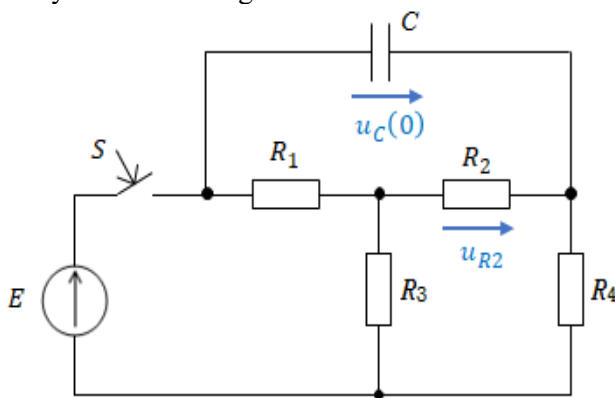


Fig. 2 - Circuit used for testing the method

For the parameter values $R_1 = 20 \Omega$, $R_2 = 15 \Omega$, $R_3 = 25 \Omega$, $R_4 = 10 \Omega$, $C_2 = 100 \mu F$, $u_C(0) = 10 V$, $E = 100 V$, the voltage across resistor u_{R2} is given by $u_{R2} = 23,077 - 42,86 \cdot e^{-1383t}$, V.

The oscillogram of the transient process was generated using time-domain simulation and exported as a tabular time series, which was subsequently used as input data for the analysis (Fig. 3).

At the first stage of testing, the analysis was carried out for the case of exact oscillogram values, that is, without taking into account discretization errors, noise, or distortions of the measurement chain. For this purpose, the forced component of the transient process was determined from the oscillogram,

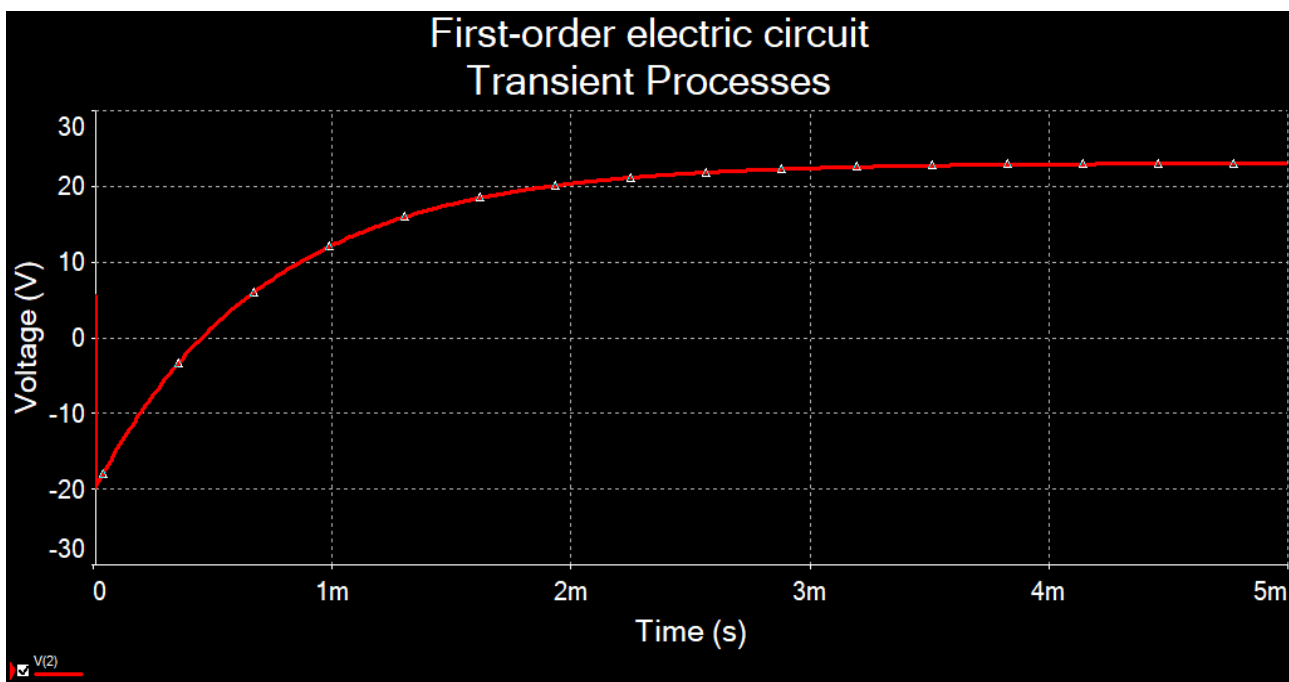


Fig. 3 - Oscillogram of the transient process

corresponding to the steady-state operating condition of the circuit after completion of the transient. Then, based on the known value of the forced component and the initial signal values, the integration constant of the natural component was calculated, and the time constant of the transient process was determined. The obtained parameter values fully coincided with the theoretical values calculated directly from the circuit parameters, which confirmed the correctness of the algorithm under ideal conditions and its consistency with the analytical solution of the linear nonhomogeneous first-order differential equation.

At the next stage of testing, the performance of the method was investigated under conditions of approximate oscillogram values that simulate real errors in experimental data acquisition. For this purpose, artificial disturbances were introduced into the

exact time series to model errors in both the time axis and the amplitude of the transient process. Such disturbances are typical of real oscillographic measurements. Under these conditions, direct graphical determination of transient process parameters leads to significant discrepancies, making it impossible to obtain reliable results without the use of specialized data processing methods.

To improve the accuracy of estimating the parameters of the natural component in the presence of approximate data, the least squares method was applied, which makes it possible to fit the exponential model of the natural response to the entire set of experimental oscillogram points. The application of this approach ensured stable estimation of the integration constant and the root of the characteristic

equation even in the presence of noise and discretization errors.

Using the proposed method and the developed software, the following parameter values were obtained: the forced component of the transient process $u_{R2f} \approx 23 V$, the integration constant $A \approx -42,8 V$, and the time constant $\tau \approx 0,000722 s$ (corresponding to the characteristic equation root $p = -1385 s^{-1}$).

Comparison with theoretical values shows that the relative error of the reconstructed transient parameters does not exceed 1%, confirming the high accuracy and robustness of the proposed method under conditions close to real experimental practice. The results demonstrate complete reconstruction of first-order transient parameters for exact oscillograms and preservation of high accuracy in the presence of measurement-like disturbances due to approximation techniques and the least squares method. This substantiates the applicability of the method to real oscillograms obtained in both simulation environments and physical measurements, as well as its suitability for engineering diagnostics and dynamic analysis of first-order electrical circuit.

5 Conclusions

In this work, a method for determining transient process parameters from their oscillograms is proposed and verified, with a focus on practical application in engineering problems related to the analysis of electrical circuits and systems. The method is based on decomposing the complete transient process into forced and natural components, followed by reconstruction of the parameters of the natural component from a time series formed on the basis of the oscillogram. Numerical experiments in the Multisim environment for a first-order circuit showed error-free reconstruction of transient parameters for exact oscillograms and a relative error not exceeding 1% under simulated measurement disturbances, confirming the robustness and practical applicability of

the method. Future work includes extending the approach to higher-order circuits and complex excitations, automating oscillogram interval selection, improving noise-robust filtering, and enhancing numerical identification and uncertainty estimation, thereby broadening its use in analysis, diagnostics, and security assessment of technical systems.

Conflicts of interest

The authors declare that they have no conflicts of interest in relation to the current study, including financial, personal, authorship, or any other, that could affect the study, as well as the results reported in this paper.

Financing

The study was conducted without financial support.

Data availability

All data are available, either in numerical or graphical form, in the main text of the manuscript.

Using artificial intelligence

The authors declare the use of an artificial intelligence tool: the ChatGPT model (OpenAI GPT-5, version 2025), release number 5.0.1. The artificial intelligence tool was used exclusively for language editing and grammar checking. The outputs provided by the artificial intelligence tool reduced the impact of human grammatical errors during the preparation of the manuscript.

Author's contribution

Dmitry Maevsky: scientific supervision, conceptualization, methodology development;
Elena Maevskaya: software, investigation;
Vitaliy Kvitchuk: experimental studies;
Vyacheslav Lavrynenko: writing of the original draft.

References

1. Hauer, J.F., Demeure, C.J. and Scharf, L.L. (1990). Initial results in Prony analysis of power system response signals', *IEEE Transactions on Power Systems*, 5(1), pp. 80–89. doi:<https://doi.org/10.1109/59.49090>.
2. Darshana Prasad Wadduwage, Annakkage, U.D. and Krish Narendra (2015). Identification of dominant low-frequency modes in ring-down oscillations using multiple Prony models. *IET generation, transmission & distribution*, 9(15), pp.2206–2214. doi:<https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2014.0947>.
3. Almunif, A., Fan, L. and Miao, Z. (2020). A tutorial on data-driven eigenvalue identification: Prony analysis, matrix pencil, and eigensystem realization algorithm, *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 30(4). doi:<https://doi.org/10.1002/2050-7038.12283>.

4. Wang, H., Liu, R., Sui, Y., Qin, G., Wang, X. and Xing, H. (2025). Effective Time-Domain Reflectometry Measurement and Fault Location for Transmission Cables. *2025 IEEE 3rd International Conference on Sensors, Electronics and Computer Engineering (ICSECE)*, pp.1019–1023. doi:<https://doi.org/10.1109/icsece65727.2025.11257131>.
5. Hwang, J.K., Liu, Y. and others (2019). DFT-Based Identification of Oscillation Modes from PMU Transient Data', *Energies*, 12(22), 4357. doi:<https://doi.org/10.3390/en12224357>.
6. Shaw, S.R. and Leeb, S.B. (1999). Identification of induction motor parameters from transient stator current measurements. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 46(1), pp. 139–149. doi:<https://doi.org/10.1109/41.744405>.
7. Lindenmeyer, D., Dommel, H.W., Moshref, A. and Kundur, P. (2001). An induction motor parameter estimation method, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, [online] 23(4), pp. 251–262. doi:[https://doi.org/10.1016/S0142-0615\(00\)00060-0](https://doi.org/10.1016/S0142-0615(00)00060-0).
8. Wang, Y. and Xu, W. (2015). Algorithms and field experiences for estimating transmission line parameters based on fault record data. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 9(13), pp.1773–1781. doi:<https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2014.1092>.
9. Bendjabeur, A., Kouadri, A. and Mekhilef, S. (2019). Novel technique for transmission line parameters estimation using synchronised sampled data. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 14(3), pp.506–515. doi:<https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2019.0702>.
10. Sarkar, T.K. and Pereira, O. (1995). Using the matrix pencil method to estimate the parameters of a sum of complex exponentials, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 37(1), pp. 48–55. doi:<https://doi.org/10.1109/74.370583>.
11. ul Hassan, I., Panduru, K. and Walsh, P.J. (2025). Non-destructive testing methods for condition monitoring: A review of techniques and tools. *Procedia Computer Science*. [online] 257. 420–427. doi:<https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.03.055>.
12. Secue, J.R. and Mombello, E. (2008). Sweep frequency response analysis (SFRA) for the assessment of winding displacements and deformation in power transformers, *Electric Power Systems Research*, 78(6), pp. 1119–1128. doi:<https://doi.org/10.1016/j.epsr.2007.08.005>.
13. Wan, Q., Li, Y., Yuan, R., Meng, Q. and Li, X. (2023). Fault Identification and Localization of a Time–Frequency Domain Joint Impedance Spectrum of Cables Based on Deep Belief . *Sensors*, 23(2), p.684. doi:<https://doi.org/10.3390/s23020684>.
14. Bandara, S., Rajeev, P. and Gad, E. (2023). A review on condition assessment technologies for power distribution infrastructure. *Structure and Infrastructure Engineering*, 20(11), pp.1834–1851. doi:<https://doi.org/10.1080/15732479.2023.2177680>.
15. Lukens, J.M., Passian, A., Yoginath, S., Law, K.J.H. and Dawson, J.A. (2022). Bayesian Estimation of Oscillator Parameters: Toward Anomaly Detection and Cyber-Physical System Security, *Sensors*, 22(16), p.6112. doi:<https://doi.org/10.3390/s22166112>.
16. Vite, O., Uribe, F. and López de Alba, C.A. (2024). Reconstruction of Harmonic and Transient Electrical Signals Through Compressed Sensing Technique. *IEEE Access*, 12, pp.175328–175337. doi:<https://doi.org/10.1109/access.2024.3487933>.
17. Jin, M., Li, H. and Liu, S. (2022). Identification and Compensation for D-Dot Measurement System in Transient Electromagnetic Pulse Measurement. *Sensors*, 22(21), p. 8538. doi:<https://doi.org/10.3390/s22218538>.
18. Eriksen, T. and Rehman, N. ur (2023). Data-driven nonstationary signal decomposition approaches: a comparative analysis. *Scientific Reports*, 13(1), 1798. doi:<https://doi.org/10.1038/s41598-023-28390-w>.
19. Karpilow, A., Derviškić, A., Frigo, G. and Paolone, M. (2022). Step detection in power system waveforms for improved RoCoF and frequency estimation. *Electric Power Systems Research*, 212, p.108527. doi:<https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108527>.
20. Fasig, J.L., White, C.K., Gilbert, B.K. and Haider, C.R. (2023). *Introduction to Non-Invasive Current Estimation (NICE)*. [online] for Transient EventsarXiv.org. Available at: <https://arxiv.org/abs/2301.10237>. [Accessed 15 Dec. 2025]
21. Lundvall, A. and Sollie, V. (2021). Quantifying Middle Frequency Transient Currents in Power Consuming Devices. Master's Programme in Renewable Electricity Production. Available at: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1580022/FULLTEXT01.pdf>. [Accessed: 15 December 2025].

22. Tektronix (2017). TBS2000B Series Digital Oscilloscopes Programmer Manual. Available at: <https://download.tek.com/manual/TBS2000-TBS2000B-Programmer-077114903.pdf>. [Accessed: 15 December 2025].

23. User Manual. SDS1000X-E Series Digital oscilloscope UM0101X-E02B. Available at: https://siglent.com.pl/public/assets/SDS1104X-E_User_Manual_UM0101E-E02B.pdf. [Accessed: 15 December 2025].

24. RIGOL User Guide DS1000Z Series Digital Oscilloscope. (2019). Available at: https://cse.sc.edu/~adowney2/resources/data_sheets/Rigol_DS1054z_users_guide.pdf [Accessed: 15 December 2025].

Received (Отримано) 12.12.2025

Received after revision (Отримано після доопрацювання) 20.02.2026

Accepted (Прийнято) 23.03.2026

Published (Опубліковано) 23.04.2026

Метод відновлення параметрів перехідних процесів в задачах безпеки критичних інфраструктур

Д. А. Маевский¹, доктор технічних наук, професор

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0666-6199>; e-mail: Dmitry.A.Maevsky@op.edu.ua;
Scopus Author ID: 55887026000

О. Ю. Маєвська¹, кандидат технічних наук, доцент

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6297-4255>; e-mail: e.j.maevskaya@op.edu.ua

В. В. Квітчук¹, аспірант

ORCID: <http://orcid.org/0009-0009-3989-6493>; e-mail: kvithuk7@stud.op.edu.ua

В. О. Лавриненко¹, аспірант

ORCID: <http://orcid.org/0009-0005-5173-050X>; e-mail: lavrviach@stud.op.edu.ua

¹Національний університет «Одеська політехніка»

Анотація. Статтю присвячено задачі відновлення параметрів перехідних процесів за їх осцилограмами в контексті забезпечення безпеки критичних інфраструктур. Актуальність роботи зумовлена тим, що в реальних умовах експлуатації електротехнічних систем параметри елементів часто є невідомими або змінюються внаслідок старіння, пошкоджень чи зовнішніх впливів, тоді як доступною інформацією залишаються лише осцилограми перехідних процесів, зафіксовані вимірювальними засобами. Показано, що відновлення параметрів перехідних процесів безпосередньо за осцилограмами та погано обумовленою задачею, точність розв'язання якої залежить від похибок дискретизації за часом і амплітудою, а також від коректного розділення вимушеної та вільної складових процесу. Запропоновано інженерний метод визначення параметрів перехідних процесів, який базується на послідовному відновленні вимушеної складової за усталеною частиною осцилограми, формуванні часового ряду вільної складової та подальшому оцінюванні її параметрів із використанням логарифмічних перетворень і методу найменших квадратів або чисельних методів нелінійної апроксимації. Розроблено спеціалізоване програмне забезпечення в середовищі Microsoft Excel із використанням мови VBA, що забезпечує автоматизовану обробку осцилограм, експортованих у табличному вигляді з цифрових осцилографів. Проведено чисельне тестування методу, яке показало повне відтворення параметрів за точних даних осцилограми та збереження точності на рівні близько 1 % за наявності збурень, що моделюють реальні похибки вимірювань. Отримані результати підтверджують ефективність і практичну придатність запропонованого підходу для задач неруйнівного контролю, діагностики та підвищення безпеки критичних технічних інфраструктур.

Ключові слова: перехідний процес, осцилограма, вільна складова, вимушена складова, метод найменших квадратів, критичні інфраструктури, безпека, програмування на VBA, Microsoft Excel, програмовані логічні контролери.

Цитування статті: Масвський Д. А., Масвська О. Ю., Квітчук В. В., Лавриненко В. О. (2026). Метод відновлення параметрів перехідних процесів в задачах безпеки критичних інфраструктур. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*, 45(121), pp.32-43. doi:<https://doi.org/10.15276/eltecs.45.121.2026.4>

About the authors (Про авторів)



Dmitry Maevsky, Dr. of Science, Professor, Professor of the Department of Electromechanical Engineering, Odessa National Polytechnic University; 1, Shevchenko Ave., Odessa, 65044, Ukraine.

E-mail: Dmitry.A.Maevsky@op.edu.ua; ph.: +380 48 705 8454

Маєвський Дмитро Андрійович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри електромеханічної інженерії, Національний університет «Одеська політехніка»; просп. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна.

E-mail: Dmitry.A.Maevsky@op.edu.ua; тел.: +380 48 705 8454

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0666-6199>



Elena Maevskaya, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electromechanical Engineering, Odessa National Polytechnic University; 1, Shevchenko Ave., Odessa, 65044, Ukraine.

E-mail: e.j.maevskaya@op.edu.ua; ph.: +380 48 705 8454

Маєвська Олена Юріївна, національний університет «Одеська політехніка», кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електромеханічної інженерії, Національний університет «Одеська політехніка»; просп. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна.

E-mail: e.j.maevskaya@opu.ua; тел. +380 48 705 8454

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6297-4255>



Kvitchuk Vitaliy Volodymyrovych, postgraduate student of the Department of Electromechanical Engineering, Odessa National Polytechnic University; 1, Shevchenko Ave., Odessa, 65044, Ukraine.

E-mail: kvithuk7@stud.op.edu.ua; ph.: +380 63 490 3883

Квітчук Віталій Володимирович, аспірант кафедри електромеханічної інженерії, Національний університет «Одеська політехніка»; просп. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна.

E-mail: kvithuk7@stud.op.edu.ua; тел.: +380 63 490 3883

ORCID: <http://orcid.org/0009-0009-3989-6493>



Lavrynenko Vyacheslav Olegovich, postgraduate student of the Department of Electromechanical Engineering, Odessa National Polytechnic University; 1, Shevchenko Ave., Odessa, 65044, Ukraine.

E-mail: lavrviach@stud.op.edu.ua; ph.: +380 67 690 2204

Лавриненко В'ячеслав Олегович, аспірант кафедри електромеханічної інженерії, Національний університет «Одеська політехніка»; просп. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна.

E-mail: lavrviach@stud.op.edu.ua; тел.: +380 67 690 2204

ORCID: <http://orcid.org/0009-0005-5173-050X>

Categories of Uncertainty Affecting Project Management Information Systems

Anatolii Savin¹, Postgraduate Student

ORCID: <http://orcid.org/0009-0009-6641-5333>; e-mail: 9042853@as.op.edu.ua

Valerii Sytnikov¹, Dr. of Technical Science, Professor

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3229-5096>; e-mail: sitnikov@op.edu.ua;

Scopus Author ID: 57190377358

¹ Odesa Polytechnic National University

Abstract. The article is devoted to the analysis of categories of uncertainty affecting project management. The authors examine ontological, epistemic, and aleatory uncertainty, revealing their impact on different phases of the project life cycle and performance outcomes. The work highlights the limitations of modern project management information systems (PMIS) in overcoming uncertainties and lays the foundation for the development of more effective systems and approaches to managing complex and dynamic project environments.

Keywords: project management, uncertainty, ontological uncertainty, epistemic uncertainty, aleatory uncertainty, project management information systems (PMIS).

Article citation: Savin A. A., Sytnikov V. S. (2026). Categories of Uncertainty Affecting Project Management Information Systems. *Electrotechnic and computer systems*, 45(121), pp.44-60. doi:<https://doi.org/10.15276/eltecs.45.121.2026.5>

Introduction

Uncertainty in projects arises from unclear objectives, changing requirements, insufficient knowledge of project teams, external disruptions, and unpredictable risks, which often lead to delays, cost overruns, and inefficiency. Modern project management information systems (PMIS) focus on structured data and deterministic models, but they struggle to provide dynamic adaptability in environments with high uncertainty.

The authors aim to develop a more adaptive, data-driven, and intelligent PMIS framework that integrates advanced analytics, real-time decision support, and scenario modeling to reduce uncertainty.

This article focuses on the analysis of categories of uncertainty affecting project management, namely the classification of sources of uncertainty according to the project life cycle, as well as the definition of uncertainty categories — ontological, epistemic, and aleatory — for building a relevant analytical foundation.

1 Purpose and Objectives of the Study

The purpose of this study is to:

1. systematize the challenges and impact of uncertainty on project planning and execution, with

particular emphasis on the limitations of modern PMIS;

2. identify specific categories of uncertainties and investigate how PMIS can be improved for more effective management of these uncertainties.

In doing so, the study aims to contribute to the development of more robust project management strategies and systems capable of anticipating, mitigating, and adapting to uncertainties.

To achieve this goal, the research covers the classification of categories of uncertainty depending on their impact on project management processes and tools.

A three-level uncertainty breakdown structure (UBS) is proposed, linked to the stages of the project life cycle.

It is also proposed to introduce a new unit of measurement for total uncertainty on a scale from 0.00 to 1.00, ranging from the ideal but unattainable complete confidence and determinism to the opposite extreme of total ignorance and chaos.

2 Challenges of Uncertainty in Project Management

Challenges of uncertainty in project planning and execution arise from the inherent unpredictabil-

lity and complexity of projects, which can lead to various project elements. In project management, uncertainty is divided into two main types — variability risks and ambiguity risks [1]:

1. *Variability risks* include uncertainties regarding key characteristics of events or operations and can be managed using methods such as Monte Carlo analysis for quantitative assessment of potential outcomes.

2. *Ambiguity risks*, where imperfect knowledge affects project objectives, can be reduced by involving external experts, conducting simulations, and employing incremental development.

Modern PMIS models often face limitations in addressing uncertainty issues due to their deterministic nature. These models are typically designed to adhere to linear processes, which may not account for the dynamic and complex nature of real projects [1]. For example, traditional PMIS may insufficiently support decision-making processes required under significant uncertainty and complexity.

Moreover, risks may emerge that can only be identified after their occurrence, necessitating a *resilience-oriented approach* to project management. This requires flexible processes, reserves, and empowered teams to adapt to unforeseen changes, thus aligning with more robust risk management capable of handling unforeseen risks [1].

This reveals a gap where *probabilistic approaches* could be more useful, incorporating flexibility and adaptability into project management practices.

Thus, the gaps in modern PMIS models and methods mainly lie in their ability to integrate and manage uncertainty. Addressing these challenges requires an evolution toward systems that can integrate *uncertainty quantification* (UQ) methodologies, support adaptive management strategies, and leverage new technologies to improve decision-making processes under uncertainty [1].

2.1 Case Study

Below are some examples from the practice guide of the Project Management Institute “Navigating Complexity” [2] and the PricewaterhouseCoopers study “Correcting the Course of Capital Projects” [4], where project outcomes were negatively affected by uncertainties exacerbated by shortcomings in project management information systems (PMIS):

- *Natural uncertainty of technological progress and innovative projects.* PMIS often struggle to manage natural uncertainty in projects involving new technologies or innovations, such as advanced construction projects or information and communication technology projects. These projects face a high level of change and instability in assumptions,

increasing risk and potentially leading to resource shortages affecting critical paths [2].

- *Inadequate risk management in large projects.* The assessment of numerous industrial projects showed that very few achieved optimal predictability in terms of cost and schedule. This indicates a widespread issue with PMIS in effectively managing complexity and uncertainty in such large-scale undertakings, often due to insufficient risk assessment and management [3].

- *Communication and stakeholder misalignment.* Projects often suffer from poor communication between stakeholders and project teams. This lack of clarity and transparent reporting leads to project delays and budget overruns, as seen in a construction project delayed due to postponed equipment procurement caused by indecisive contractor selection [3].

- *Inability to anticipate risks in complex environments.* High-profile projects, such as infrastructure developments, can be severely affected by unforeseen political changes or legislative shifts, leading to scope disruptions and schedule delays. PMIS may fail to account for such emerging risks without robust forecasting tools and flexible methodologies [2].

These examples highlight some areas where PMIS can be improved for more effective uncertainty management, emphasizing the need for enhanced adaptive and predictive capabilities in project management systems.

3 Research Methodology

The methodological framework adopted in this research is founded upon principles and tools from several scientific and management domains, ensuring a comprehensive approach to the analysis of uncertainty in project management information systems. The study utilizes *uncertainty quantification* to systematically identify, measure, and address different types of uncertainty inherent in project environments. Chaos theory and systems theory, with a particular emphasis on *partially observable systems*, provide the foundational perspective for modeling complex, dynamic, and often non-linear interactions within projects. *Stochastic processes* from probability theory enable the representation and simulation of randomness and variability, which are vital to capturing aleatory and epistemic uncertainties.

Decision theory is employed to support the analysis of *choice under uncertainty*, facilitating the assessment of alternative strategies and their potential outcomes. The research develops and describes models with a focus on real-world constraints, such

as limited resources, high environmental volatility, and the scalability and adaptability within PMIS.

Throughout the research, iterative prototyping and feedback loops are used to refine models and ensure their relevance and usability for project management practitioners. The selection of methodologies and tools aligns with the contemporary needs of project-oriented organizations facing increasing complexity, digital transformation, and the demand for real-time decision support. In sum, the research methodology combines scientific foundations with practical project management techniques to deliver scalable and actionable recommendations for advancing PMIS capabilities in the face of deep and multi-faceted uncertainty.

4 Categories of Uncertainty

Unfortunately, there is no single definition of the term “uncertainty”. The best definition the author of this article has found was proposed by Douglas Hubbard in the book “How to Measure Anything”: Uncertainty is the lack of complete certainty, that is, the existence of more than one possibility. The “true” outcome/state/result/value is not known [4].

That is, *uncertainty* is the absence of certainty, a state of limited knowledge, when it is impossible to accurately describe the existing state, the future result, or when more than one possible outcome exists.

In most literature and research, two categories of uncertainty are distinguished — aleatory and epistemic — but for project management this is insufficient. Roman Hansch and Ahmad Adey in their work “System Theoretic View on Uncertainties” [5] define three *categories* of uncertainty, which together cover all aspects of project management:

- *Ontological (existential) uncertainty*, which can be defined as a state of complete lack of understanding of the existence and purpose of the model of the relevant aspect of the system.
- *Epistemic (knowledge) uncertainty*, which is related to the lack of knowledge about the system model and the inaccurate encoding of the physical system in the model.
- *Aleatory (randomness) uncertainty*, which can be considered as the randomness of the process represented by the system model.

In PMBOK, epistemic uncertainty is called “ambiguity risk,” and aleatory uncertainty is referred to as “variability risk” [1], but such terminology shifts the focus from the essence and source of the problem to dealing with its symptoms.

4.1 Mathematical Perspective

In mathematics, uncertainty can be described using probability distribution. Ontological uncertainty means that we cannot choose a direction of movement and/or a system model at all. Epistemic uncertainty means that we do not know exactly which probability distribution to use. Aleatory uncertainty, on the other hand, means that we cannot predict what the random sample from a known distribution will be.

For example, with *homoscedastic uncertainty* (Fig. 1), the expected value or mean $\mathcal{E}[\sigma]$ in the data remains unchanged. This can be seen in the simple linear regression model $y = f(x) + \varepsilon$, where ε corresponds to the normal distribution (μ, σ^2) and does not depend on the variable x (μ is the mean of the distribution, σ^2 is the variance). This means that the randomness remains unchanged at different levels of x , demonstrating constant variance [6].

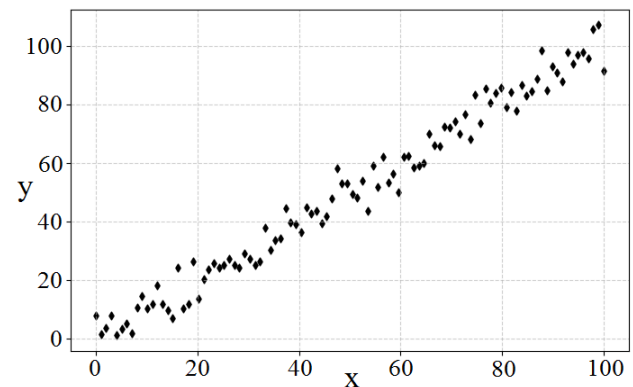


Fig. 1 - Homoscedastic Uncertainty

Conversely, *heteroscedastic uncertainty* (Fig. 2) arises when the variance $\sigma(x)$ changes depending on the variable x . This can be assessed using methods such as Monte Carlo modeling or predictive

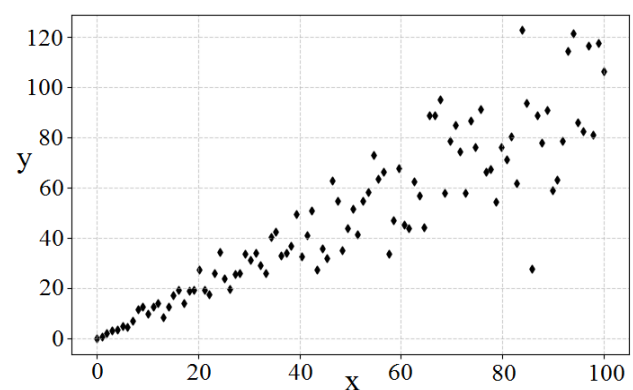


Fig. 2 - Heteroscedastic Uncertainty

machine learning algorithms. In this case, randomness and noise vary depending on different levels of observed data, for example, when planning or

control errors increase at higher levels of stress [6].

Heteroscedastic uncertainty can be found in real-life scenarios such as turbulence in fluid modeling, whereas homoscedastic uncertainty can be illustrated by rolling a die and calculating the statistics of the results, where the variance remains constant.

However, to cover all scenarios, one should also consider a kind of “pure” uncertainty (Fig. 3), where the output y is purely random and completely

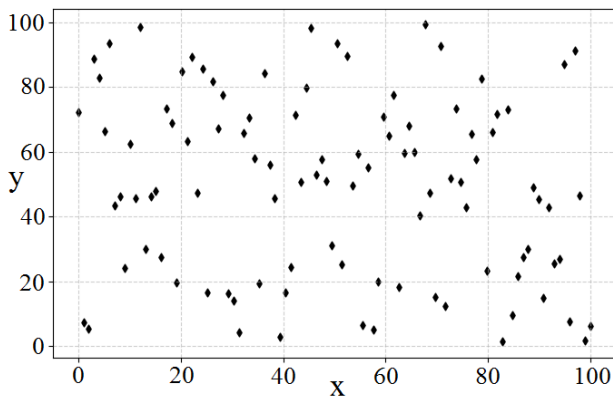


Fig. 3 – “Pure” Uncertainty

independent of the input x , that is, $y = \epsilon$, where ϵ is a random variable drawn from a probability distribution. This setup illustrates a situation in which the input variable x has no predictive power over the output variable y , emphasizing the essence of pure randomness or complete uncertainty. This scenario highlights a purely stochastic process, where the absence of any regularity embodies total uncertainty.

Since this scenario does not have a specific clear name similar to “homoscedasticity” or “heteroscedasticity”, we will call it “pure randomness”, assuming that the random values come from the same probability distribution and are statistically independent. This characterizes a situation of maxi-

imum entropy, when there is complete unpredictability in the relationship between variables.

4.2 In Project Management

In project management, heteroscedastic uncertainty may arise in budgeting processes, when costs differ significantly depending on the phases or conditions of the project, for example, increased expenses during complex project stages. Conversely, homoscedastic uncertainty can be observed in projects with stable, predictable costs, such as routine technical implementation tasks where costs remain unchanged over different periods. This reflects situations where the variance or unpredictability of outcomes (financial, resource, or time-related) depends on specific project variables or remains constant.

In the context of project management, each stage of the project life cycle is primarily associated with different categories of uncertainty (Fig. 4):

1. *Pre-project and initiation.* This phase involves a high level of ontological uncertainty, as fundamental questions about the existence, purpose, and objectives of the project are determined. This often requires clarification of such project aspects as “why” and “for what purpose,” aligning the project with these existential questions. This phase also deals with broader existential issues regarding whether the project aligns with the organization’s strategic vision and goals.

2. *Organization and planning.* Here, the focus shifts to epistemic uncertainty. This involves gathering detailed information, developing plans, estimating resources and timelines, and making assumptions based on existing knowledge. At this phase, uncertainty is related to gaps in information and understanding, which can often be reduced through analysis and research.

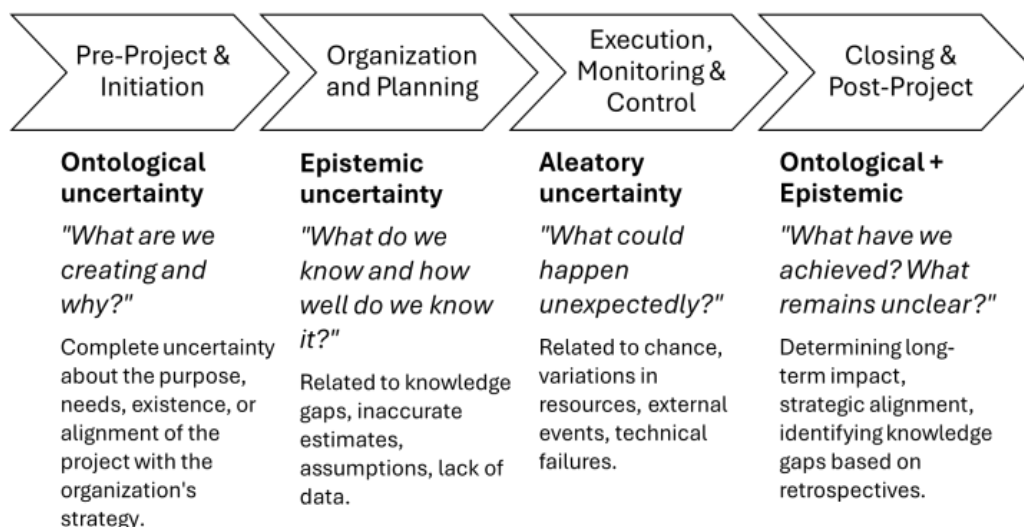


Fig. 4 - Correlation of Project Life Cycle Stages with Categories of Uncertainty

3. *Execution, monitoring, and control.* Aleatory uncertainty becomes more prominent at this stage due to the inherent variability and randomness that arise during project execution. This includes dealing with discrepancies in resource availability, unexpected project changes, and real-time fluctuations that affect progress and outcomes. The project team must account for these uncontrollable variables through continuous monitoring and adaptive control.

4. *Closure and post-project.* Although most uncertainties should already be resolved at this stage, some ontological uncertainty may remain, especially regarding the long-term impact and strategic alignment of project outcomes. In addition, the analysis of lessons learned may reveal epistemic uncertainty that arose during execution and how it may affect future projects.

Such alignment helps to determine the appropriate strategies for each stage, ensuring effective management and elimination of uncertainties inherent to each phase.

5 Decomposition of the Uncertainty Categories

The study of uncertainty is of high importance for understanding and managing the complex and unpredictable nature of various phenomena that affect a wide range of fields, from philosophy to practical decision-making. This section delves into the intricate landscape of uncertainty, classifying it into three main categories: *ontological (existential) uncertainty*, *epistemic (knowledge) uncertainty*, and *aleatory (random) uncertainty*. Each category represents different dimensions of uncertainty, reflecting the diverse nature and origins of unknowns that challenge understanding and predictability.

Within these categories, various subcategories further detail specific types of uncertainties that may influence understanding and decision-making in different disciplines. By outlining these categories and subcategories, this section establishes a comprehensive *uncertainty breakdown structure (UBS)* for assessing the diverse manifestations of uncertainty (Fig. 5), enhancing the ability to recognize and systematically address issues related to uncertainty.

5.1 Ontological Uncertainty

The term “*ontological*” comes from the Greek words “*οντος*,” meaning “being” or “that which exists,” and “*λογος*,” meaning “study” or “science.” Ontology, therefore, is the study or doctrine of being, encompassing the philosophical investigation of the nature, essence, and fundamental problems of existence. It is a core branch of philosophy that

seeks to clarify the essential aspects of reality, the nature of entities, and the frameworks through which existence is understood.

Ontological uncertainty arises from the unconscious use of inappropriate methodologies or belief systems. It is unrecognized, not subject to quantitative measurement, and involves scenarios where the entities and interactions of concern are not fully known or understood. This category of uncertainty creates significant challenges, as it involves navigating and identifying new or previously unrecognized elements, domains, or contexts. Thus, it requires categorization, dealing with fundamental questions about existence, and understanding of entities and their relationships. The complexity of ontological uncertainty lies in its deeply rooted connection to the essence of what is being studied and is often not amenable to direct measurement or quantitative assessment.

In project management, *ontological uncertainty* implies doubt regarding the fundamental purpose, role, and existential impact of the project. This requires consideration of why the project is being implemented and what its ultimate goals are beyond immediate practical execution. This category of uncertainty compels project managers to align project objectives with strategic visions and long-term consequences, often involving profound existential and strategic considerations that go beyond short-term goals and frequently beyond the authority of project teams. It demands a fundamental understanding of the project’s meaning and its place within the broader organizational context, necessitating engagement with complex decision-making processes concerning the very nature and purpose of the initiative. This reflection on the existential dimensions of the project ensures that it is not only feasible but also meaningful within its broader organizational and societal structure.

Through analysis of publications and materials, as well as consultations and discussions with experts, the authors of this article has decided to distinguish six subcategories of ontological uncertainty:

5.1.1 Truth Uncertainty. Truth uncertainty encompasses the difficulties in determining the *accuracy or veracity of assumptions and propositions* in various contexts. This uncertainty arises when it is unclear whether the foundational beliefs or data are accurate, leading to challenges in verifying the assumptions underlying decisions and strategies. The main issue of truth uncertainty lies in ensuring that actions are based on reliable and validated information, as relying on questionable premises can result in ineffective or erroneous outcomes. Address

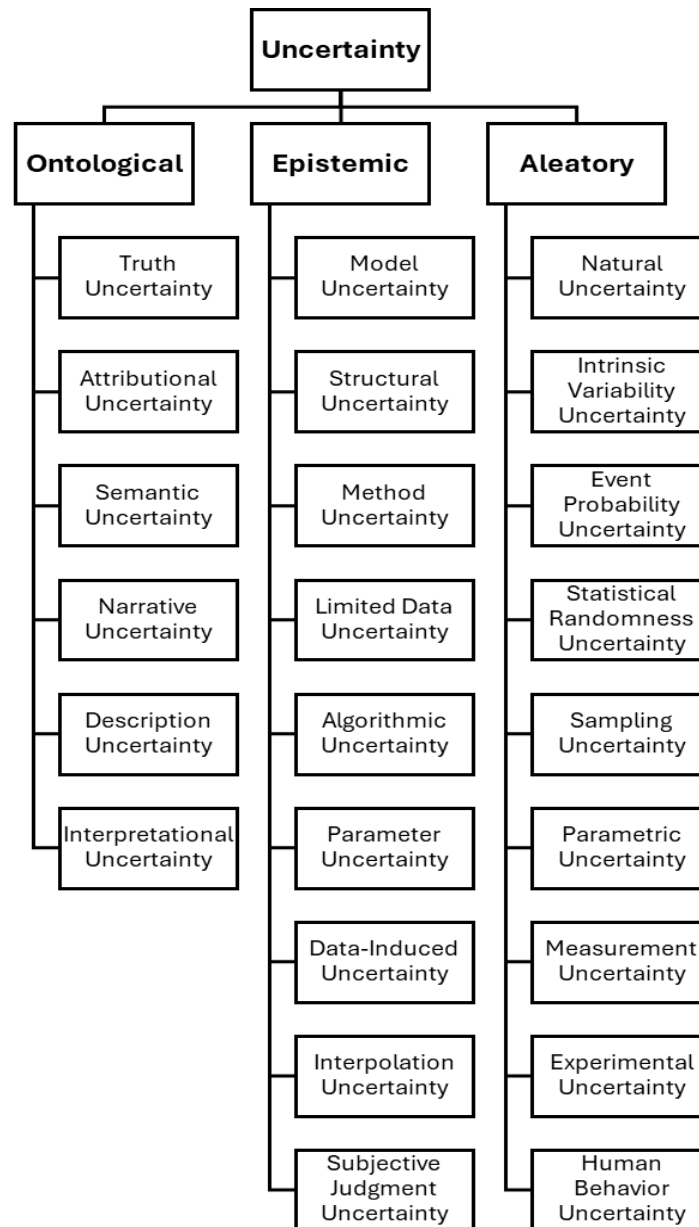


Fig. 5 - Uncertainty Breakdown Structure.

ing this uncertainty requires rigorous verification and evaluation processes to confirm that assumptions and propositions accurately reflect reality, thereby reducing the risk of significant errors or strategic misalignments in various fields [5].

In project management, *truth uncertainty* can significantly affect how strategies are formulated and implemented. It requires project managers to critically analyze the assumptions underlying their plans and establish robust verification processes to assess their reliability. Decisions must be continually reviewed to ensure alignment with validated truths, and it may be necessary to develop contingency plans to address potential discrepancies between assumptions and actual conditions. Such vigilance promotes informed decision-making and increases

project resilience by reducing the risk of basing strategies on unverified or inaccurate premises.

5.1.2 Attributional Uncertainty. Attributional uncertainty involves ambiguity in assigning or understanding the *roles, identities, and responsibilities* of various objects or agents within a system or domain. This category of uncertainty may arise when there is a lack of clarity regarding who or what is responsible for specific outcomes, changes, actions, or decisions in the system. Issues associated with attribution uncertainty include potential confusion about accountability, difficulties in coordinating actions, and challenges in effectively evaluating performance or results. Addressing attributional uncertainty requires clear communication, well-

defined roles, and agreement among stakeholders to ensure proper allocation and effective management of responsibilities [7].

In project management, *attributional uncertainty* can lead to ambiguity regarding the roles of team members, stakeholders, or organizational units. This ambiguity may result in overlaps or gaps in responsibilities, affecting communication, coordination, and accountability. To cope with this uncertainty, project initiators must ensure that roles and responsibilities are clearly defined and communicated to all involved parties, particularly sponsors and project owners. Effective solutions may include the creation of detailed project role descriptions, the establishment of clear authorities, and the creation of forums for ongoing clarification to prevent misunderstandings.

5.1.3 Semantic Uncertainty. Semantic uncertainty arises from ambiguity and lack of clarity in *meanings and definitions* during communication. This uncertainty occurs when different participants assign different meanings to the same terms, phrases, or actions, often due to differences in experience or perspectives. The issues it presents include potential misunderstandings and misinterpretations, which can hinder effective communication and collaboration. Addressing semantic uncertainty involves improving terminology, ensuring shared understanding, and fostering clear communication among participants to avoid discrepancies in interpretation [7].

In project management, *semantic uncertainty* can lead to misunderstandings and misalignment of objectives if team members interpret key terms or project requirements differently. This can affect everything from goal setting to task execution and outcome evaluation. To mitigate semantic uncertainty, project management offices (PMO) and project managers should prioritize establishing a common language and mutual understanding within the team. Methods such as glossaries, standardized documentation, and alignment meetings can be helpful. Additionally, ongoing communication and feedback cycles help ensure that all team members interpret terms and concepts consistently, reducing the risk of errors and inefficiency due to misinterpretation.

5.1.4 Narrative Uncertainty. Narrative uncertainty revolves around the use of *storytelling and narrative structures* to comprehend complex, unpredictable situations. It recognizes that in the face of unforeseen outcomes, embedding decisions and processes within coherent narratives can provide direction and context, helping individuals and teams navigate uncertainty. This form of uncertainty ena-

bles the understanding of complex interactions that cannot be immediately anticipated, and supports focus and adaptability by creating stories and ideas that make sense in changing circumstances. The main challenge with narrative uncertainty lies in ensuring that narratives accurately reflect reality and provide meaningful guidance amid inherent unpredictability [7].

Narrative uncertainty uniquely affects project management by shaping how projects are explained and understood through *storytelling*. It allows project managers to use descriptive structures to ensure coherence and alignment within teams, especially when facing uncertain outcomes or complex situations. By developing *stories* that encompass project goals, strategies, and actions, business analysts and project managers can maintain team focus and adaptability. These narratives help translate abstractions or project details into an understandable and interconnected context, ensuring that all stakeholders remain informed and aligned with the project's direction, fostering resilience and shared understanding of the project's path despite uncertainty.

5.1.5 Description Uncertainty. Description uncertainty relates to issues associated with the *interpretation and representation* of the fundamental nature or form of models or phenomena. It arises when there is a lack of clarity or knowledge about the underlying science or mechanisms governing data and system behavior. This uncertainty becomes particularly evident when the available data do not clearly indicate a single model or when multiple potential models exist, each offering different interpretations. The main challenge of description uncertainty lies in accurately developing mechanistic understandings and causal explanations, which influence the fundamental comprehension and interpretation of observed phenomena [7].

Description uncertainty affects project management by complicating the precise definition and modeling of project goals and systems. It arises when there is no clarity regarding fundamental processes or when multiple interpretations of the same data or phenomena exist. This influences how project objectives are set and strategies are determined. Project managers must be flexible and open to revising models and strategies as new data or interpretations emerge. This adaptability is crucial for ensuring that the project remains aligned with its ultimate objectives, despite changes in understanding. Addressing this uncertainty requires iterative assessments and diverse perspectives to refine project plans and improve the understanding of system complexity.

5.1.6 Interpretational Uncertainty. Interpretational uncertainty arises when there are inconsistencies in extracting meaning from data or models due to *unclear or inconsistent decoding methodologies*. This category of uncertainty is related to the accuracy and consistency in interpreting known information, rather than the discovery or definition of new entities. The main issue associated with interpretational uncertainty is ensuring that data or model outputs are understood in the same way by different interpreters, minimizing discrepancies that can lead to inconsistent interpretations and incorrect decisions. This category of uncertainty highlights the importance of establishing clear, consistent methodologies for data interpretation [7].

In project management, *interpretational uncertainty* can affect how project inputs and reports are understood and acted upon. If team members apply different methodologies or criteria for interpreting project information, discrepancies in understanding may arise, potentially leading to inconsistent actions and decisions. Project managers can mitigate this uncertainty by standardizing interpretation methodologies, providing clear guidance on data analysis, and ensuring thorough training and communication regarding these standards. By applying a consistent approach to interpretation, project teams can reduce errors and inefficiencies and ensure that all participants have a shared understanding of project data and outcomes.

5.2 Epistemic Uncertainty

The term “*epistemic*” comes from the Greek word “*επιστημη*,” meaning “knowledge” or “science.” It is fundamental in ancient philosophy, reflecting the pursuit of understanding, cognition, and systematic investigation of what is known. Epistemology is the branch of philosophy that studies the nature, origin, and limits of human knowledge.

Epistemic uncertainty, also known as *systematic uncertainty*, refers to aspects that could, in principle, be known but are currently unknown. This uncertainty arises from incomplete models or deliberately concealed data. It reflects the gaps and limitations in our current understanding of or information about a phenomenon or system. Addressing epistemic uncertainty involves identifying and filling these knowledge gaps through better data collection and improved models. The task is to acknowledge and recognize these gaps and actively work to reduce uncertainty by increasing the reliability of the data and models used to understand complex systems.

In project management, *epistemic uncertainty* significantly affects decision-making and strategic

planning processes. It arises from a lack of knowledge or incomplete information, which directly impacts how projects are conceived, planned, executed, and evaluated. Managing epistemic uncertainty requires project managers to be clearly aware of knowledge gaps and to continuously seek improvement and refinement of their models and assumptions. This may involve gathering additional data, enhancing analytics, and revising project assumptions as more information becomes available. Project managers should also employ flexible approaches that adapt to new insights, ensuring that changes in knowledge do not derail the overall project objectives. Successfully overcoming epistemic uncertainty involves utilizing learning processes and iterative improvement to make more informed and resilient project decisions.

Through analysis of publications and materials, as well as consultations and discussions with experts, the authors of this article have decided to distinguish nine subcategories of epistemic uncertainty:

5.2.1 Model Uncertainty. Model uncertainty refers to doubts and issues related to the *selection and validation of the correct model* for accurately representing a real-world system. This category of uncertainty arises when there is uncertainty about whether the chosen model is appropriate or sufficient to capture the complexity and dynamics of the system under study. Issues of model uncertainty include potential inaccuracies in predictions and decisions based on these models, as they may not fully or correctly reflect system behavior. It is important to recognize that model uncertainty encompasses the entire process of selecting, implementing, and validating models, so it is crucial to ensure regular review and updating of selected models to reflect new data and insights [8].

In project management, *model uncertainty* can significantly affect decision-making and schedule development. Choosing an inappropriate model can lead to suboptimal strategies, erroneous forecasts, and misallocation of resources. To manage model uncertainty, project managers should engage in thorough model selection processes, ensure ongoing model validation, and remain open to incorporating new findings and technologies into existing models. Collaborative processes that incorporate diverse knowledge and perspectives can help assess model adequacy. Additionally, applying flexible methodologies that allow the model to be adapted as more information becomes available can help mitigate the effects of model uncertainty, resulting in more robust and adaptive project execution.

5.2.2 Structural Uncertainty. Structural uncertainty refers to inadequacy or bias in models that arises from *incomplete or inaccurate knowledge of the underlying physics or phenomena* they attempt to represent. This uncertainty occurs when models are unable to capture the complexity or true nature of real-world systems, often due to simplifications or assumptions made during the construction of the model structure. Issues related to structural uncertainty include potential inaccuracies in predictions and insights provided by the model structure, as these may not fully account for all variables or processes affecting the system. Since models are approximations of reality, this uncertainty highlights the need for continuous improvement and validation of models to enhance the representation of complex systems [9].

In project management, *structural uncertainty* can affect how projects are planned and executed, especially when structural models or simulations are used for decision-making. If the underlying project models are biased or misrepresent actual conditions, this can lead to incorrect strategies and/or inefficient execution. To manage structural uncertainty, project managers should engage in ongoing model validation and adaptation, incorporating new data and insights to better align models with reality. This often involves interdisciplinary collaboration and leveraging advances in computational techniques for continuous model improvement. Ensuring that models accurately reflect the systems they are intended to represent helps project managers make more informed and reliable decisions, ultimately improving project outcomes and reducing the risk of strategic errors.

5.2.3 Method Uncertainty. Method uncertainty is related to the *selection and implementation of computational methods* used for parameter estimation and forecasting in models. This uncertainty arises when the chosen methods and their implementation potentially introduce variability or inaccuracies, affecting the reliability of the results. The main issue with method uncertainty is its direct impact on analysis outcomes, as the methodological choices made can significantly influence the reliability of forecasts and estimates. Ensuring the correct selection and proper application of computational methods is crucial for achieving accurate and trustworthy results [8].

In project management, *method uncertainty* can affect how decisions are made, especially when analysis or forecasting relies on certain methodologies. If the chosen method is unsuitable for the context or poorly implemented, this can lead to biased or inaccurate results, impacting project strategies

and outcomes. To address this uncertainty, project managers should carefully assess the suitability of different methods for the needs and objectives of a particular project. Regular review and validation of methods, as well as incorporating expert opinions and benchmarking against other standards, can help ensure the integrity and reliability of project analysis, ultimately leading to more informed and effective decision-making.

5.2.4 Limited Data Uncertainty. Limited data uncertainty arises from *insufficient or absent data*, which restricts the ability to make accurate and well-substantiated conclusions about the system. This category of uncertainty is particularly challenging when dealing with new or exploratory fields where comprehensive datasets have not yet been developed. The main issue with limited data uncertainty is that it can hinder the accuracy and reliability of models and analyses, leading to less confident decision-making. Incomplete data may result in models failing to capture the full complexity or variability of the system, making conclusions less reliable [10].

In project management, *limited data uncertainty* can affect planning, resource allocation, and risk assessment. When data are scarce, project managers may face challenges in forecasting project outcomes or accurately estimating timelines and costs. To mitigate this uncertainty, project managers should prioritize data collection, encourage iterative cycles of data gathering and analysis, and use expert judgment or proxy data when necessary. It is crucial to employ adaptive management strategies that allow for adjustments as new data become available. By proactively addressing limited data uncertainty, project managers can improve their ability to make informed, flexible decisions and enhance overall project execution and outcomes.

5.2.5 Algorithmic Uncertainty. Algorithmic uncertainty arises from *numerical approximations and errors introduced by computational algorithms* used in models. As numerical and statistical models become increasingly complex to realistically represent real-world systems, it is often necessary to compromise between computational cost and model accuracy. This may involve using simpler algorithms with lower computational expense, which can introduce errors into the modeling process. The challenge with algorithmic uncertainty is to balance accuracy and computational efficiency, ensuring that errors from numerical approximations do not significantly affect the accuracy or reliability of the model [8].

In project management, *algorithmic uncertainty* can impact project outcomes, especially when project decisions rely on simulation models or computa-

tional forecasts. Decisions made using models that overlook important details due to numerical errors. To address this issue, project managers can implement verification processes to assess and minimize the impact of algorithmic errors on outcomes. It is crucial to choose appropriate computational methods, such as Monte Carlo, that balance accuracy and computational efficiency. Additionally, integrating more robust verification and sensitivity analysis processes can help identify and mitigate significant algorithmic uncertainty, thereby increasing the reliability of model-based decisions in projects.

5.2.6. Parameter Uncertainty. Parameter uncertainty¹ arises when the *values of model parameters* are specified with *inaccurate knowledge or lack of direct measurements*. This category of uncertainty pertains to the specific values required for model parameters, which may be unknown, poorly estimated, or derived from insufficient data. Issues related to parameter uncertainty include potential inaccuracies in model predictions and decisions made using these models. Without accurate parameter values, models may not accurately represent reality, leading to errors and inefficiencies in various applications. Reducing parameter uncertainty usually involves obtaining more precise data, improving measurement methods, and using statistical techniques for better estimation [9].

In project management, *parameter uncertainty* can significantly affect the accuracy of forecasts, resource allocation, and strategy development. Inaccurate parameter values can lead to errors in budgeting, planning, and risk assessment. Project managers can reduce parameter uncertainty by ensuring continuous data collection and refinement processes, employing advanced statistical methods to improve parameter estimation, and engaging subject matter experts to validate parameter assumptions. This may also include conducting sensitivity analysis to understand the impact of parameter variability on model outcomes.

5.2.7 Data-Induced Uncertainty. Data-induced uncertainty is a category of uncertainty that arises from decisions made during the *selection, cleaning, and transformation of input and output data*. This uncertainty affects the clarity, consistency, and reliability of the data used in models or analyses. The

involve algorithmic approximations may sometimes problem with data-induced uncertainty lies in ensuring that these data processing decisions do not inadvertently introduce bias, errors, or inconsistencies that can distort results and conclusions. Maintaining data integrity and accuracy throughout the entire lifecycle requires careful data management practices [8].

In project management, *data-induced uncertainty* and poor data handling practices can lead to inaccurate project assessment and strategy development. To manage this uncertainty, project managers should implement rigorous data governance frameworks, ensuring transparent and consistent processes for data selection, cleaning, and transformation. This may involve using standardized protocols for data handling, training team members in best practices, and conducting ongoing validation checks to ensure data quality and reliability. By addressing data-induced uncertainty, project managers can enhance the credibility of their analyses, leading to more informed and effective project strategies and decisions.

5.2.8 Interpolation Uncertainty. Interpolation uncertainty arises when missing data in a model simulation or experimental dataset are *filled using interpolation algorithms*, which can introduce errors or noise. This category of uncertainty is associated with the challenges of accurately predicting or estimating values for data points that have not been directly observed or measured. The main issue lies in the potential inaccuracies that may result from using algorithms to estimate these values, which may not fully capture the complexity or variability of the real-world system being modeled. Consequently, interpolated data may contribute to biased or unreliable model forecasts [8].

In project management, *interpolation uncertainty* can affect the reliability of forecasts or analyses when datasets are incomplete. Decisions that depend on interpolated data may be based on estimates that do not adequately reflect actual conditions, leading to potential errors in planning or execution. To manage interpolation uncertainty, project managers should ensure robust data collection processes to minimize the need for interpolation.

Additionally, they should carefully select and validate interpolation algorithms, using sensitivity analysis to understand their impact on project decisions. By recognizing the limitations of interpolated data and implementing validation checks, project managers can improve the accuracy and reliability of project insights and strategies.

¹ Do not confuse with “parametric uncertainty.” Although both categories relate to uncertainties associated with model parameters, *parameter uncertainty* is epistemic and concerns the accuracy of known parameters, whereas *parametric uncertainty* is aleatory, dealing with the natural variability inherent in the system’s input variables.

5.2.9 Subjective Judgment Uncertainty. Subjective judgment uncertainty arises from *biases and variability originating from human decisions and expert opinions* during modeling or decision-making processes. This uncertainty results from personal or expert influence rather than technical or data-driven factors and can affect the outcomes of models or strategies through bias or variability. Two subtypes of subjective judgment uncertainty include *moral uncertainty* and *rule uncertainty* [11]:

- *Moral uncertainty* involves situations where applicable moral rules are absent, prompting decision-makers to rely on broader, generalized moral principles to guide their choices. These scenarios often lead to decisions that may not fully satisfy or resolve the specific ethical dilemmas encountered.

- *Rule uncertainty* pertains to decisions made based on intuition rather than established rules. Here, choices are guided by internal moral beliefs and experiential knowledge, sometimes resulting in actions shaped by intuition in the absence of clear rules or guidelines.

The main issue with subjective judgment uncertainty is that it can lead to inconsistent or biased conclusions that rely on individual interpretation rather than standard frameworks [10].

In project management, *subjective judgment uncertainty* can influence decision-making processes, especially where expert opinions and judgments guide project strategies. This can result in variability or bias, affecting the consistency and reliability of project outcomes. To counter this uncertainty, project managers can incorporate diverse perspectives and foster an environment where critical evaluation and validation of expert opinions are standard practice. Establishing a decision-making system that is transparent and supported by documentary justification can reduce bias. Additionally, awareness of moral uncertainty and rule uncertainty enables managers to effectively incorporate ethical discussions and intuitive ideas, ensuring that personal biases do not affect project objectives and the objectivity of decision-making.

5.3 Aleatory Uncertainty

The term “*aleatory*” comes from the Latin word “*alea*,” meaning “chance” or “dice,” and refers to the concept of risk or randomness inherent in games of chance. In the context of uncertainty, “*aleatory*” is associated with random processes, emphasizing the inherent variability and unpredictability of certain phenomena. It highlights the randomness of processes whose outcomes cannot be precisely determined or reproduced due to intrinsic variability.

Aleatory uncertainty, also known as *stochastic uncertainty*, *chaotic uncertainty*, or uncertainty of inherent variability, describes a category of uncertainty that arises from the intrinsic randomness present in natural processes. It encompasses unknowns that change with each repetition of an experiment or observation due to factors such as environmental conditions, equipment performance, human behavior, or natural fluctuations. This uncertainty is often characterized using probability distribution functions, reflecting its irreducible nature — it cannot be eliminated even with more precise measurement tools. The challenge of aleatory uncertainty lies in its inherent unpredictability, which requires probabilistic modeling and analysis methods, where decisions are made based on statistical probability rather than deterministic outcomes.

In the field of project management, *aleatory uncertainty* affects phases where inherent variability and unpredictability are paramount, such as during the execution or operational phase. Project managers must account for this randomness in their plans and forecasts, knowing that certain aspects of the project, such as timelines, resource availability, or environmental conditions, may change unexpectedly. To manage aleatory uncertainty, project teams often employ various risk management strategies, using statistical and probabilistic models to anticipate potential deviations and develop contingency plans for likely and unforeseen circumstances. While precise control over random variability is impossible, understanding and preparing for its impact can help mitigate its effects on project outcomes, maintaining flexibility and the ability to respond to unforeseen changes.

Through analysis of publications and materials, as well as consultations and discussions with experts, the authors of this article have decided to distinguish nine subcategories of aleatory uncertainty:

5.3.1 Natural Uncertainty. Natural uncertainty represents the inherent randomness and variability of natural, social, and economic processes. This category of uncertainty is caused by *spatial and temporal heterogeneity*, highlighting how natural systems and phenomena inherently fluctuate in unpredictable ways. Natural uncertainty is considered irreducible, meaning it *cannot be eliminated* through additional data collection or improved equipment, although it can be better understood through enhanced quality and quantity of observations. The main issue associated with natural uncertainty is the inability to accurately predict or control these stochastic fluctuations, which requires strategies that account for and adapt to such unpredictability [12].

In project management, *natural uncertainty* can significantly impact projects sensitive to social, environmental, political, or economic conditions, such as construction, agriculture, or energy production. This compels project managers to incorporate flexibility and adaptability into their plans, considering the inherent unpredictability of natural systems. This may include developing robust risk management strategies that incorporate contingencies for likely circumstances, such as changes in weather conditions or economic fluctuations. By recognizing and planning for natural uncertainty, project managers can enhance the resilience of their projects, ensuring operational effectiveness and the achievement of objectives even in the face of unpredictable external variables.

5.3.2 Intrinsic Variability Uncertainty. Intrinsic variability uncertainty concerns natural fluctuations and inherent variabilities present in the *state of a system*. This category of uncertainty arises due to factors such as variations in material properties or economic conditions, such as market demand and interest rates. These fluctuations are an integral part of the system's state, making them uncontrollable and inevitable. The main issue lies in their unpredictability, which can lead to significant fluctuations in outcomes even under unchanged conditions [9].

In project management, *intrinsic variability uncertainty* affects how projects deal with unpredictable social or economic factors. For example, in industries such as finance or manufacturing, where market conditions or consumer behavior can vary greatly. Project managers can manage this uncertainty by incorporating flexibility into their planning processes, allowing for adaptive responses to these variable states. This may include developing contingency plans, establishing adaptive performance indicators, and ensuring that supply chains or schedules can account for changes.

5.3.3 Event Probability Uncertainty. Event probability uncertainty focuses on the inherent randomness associated with the *dynamics of system events*, such as the occurrence of natural disasters or sudden economic changes. This uncertainty highlights the fact that the probability of such impactful events is inherently unpredictable and cannot be determined or reduced through additional information or data collection. This especially complicates the planning of rare but destructive events, as these events can drastically change the system's dynamics when they occur [9].

In the field of project management, *event probability uncertainty* requires a proactive and robust approach to risk management, especially in industries or regions vulnerable to unexpected disruptions. Project teams should develop comprehensive risk

environmental, political, or economic conditions, such as construction, agriculture, or energy production. mitigation strategies, such as creating disaster recovery plans or implementing insurance schemes to minimize the impact of such events. By maintaining flexibility in project schedules and resource allocation, project managers can enhance the resilience of their system, ensuring rapid recovery after disruptions.

5.3.4 Statistical Randomness Uncertainty. Statistical randomness uncertainty refers to the inherent randomness observed in data due to the fundamental *probabilistic nature of the phenomena being measured*. This uncertainty is modeled using probability distributions and highlights the variability that naturally arises in data sets obtained from processes that are fundamentally stochastic. The main issue of statistical randomness is its impact on data analysis and interpretation, as it requires careful consideration to separate true patterns from random noise. Effective management of this uncertainty involves the use of statistical methods that account for and correctly interpret such variability, avoiding misleading conclusions [9].

In project management, *statistical randomness uncertainty* affects how data are analyzed and interpreted, influencing decision-making and strategy development processes. Projects that rely on statistical analysis should use robust analytical methods that can properly account for randomness in data sets, ensuring the accuracy and reliability of information. Project managers can mitigate this category of uncertainty by using advanced statistical tools and methodologies, including regular data reviews and maintaining transparency regarding the limitations of the analysis.

5.3.5 Sampling Uncertainty. Sampling uncertainty is the variability that arises when conclusions about a large population are drawn based on a random sample. This uncertainty occurs due to the possibility that the sample may capture effects that are spatially or temporally transient, may overemphasize or omit certain phenomena, and may *inaccurately represent the broader population*. This variability typically appears in the term of statistical analysis error. The key issue of sampling uncertainty is to ensure that conclusions drawn from sample data are valid and suitable for generalization to the larger population, which requires careful sample design and analysis methods to minimize bias and errors [12].

In project management, *sampling uncertainty* can affect the reliability of project estimates and decision-making processes, especially when project decisions depend on data obtained from samples

rather than the entire population. To manage this uncertainty, project managers should ensure robust sampling strategies aimed at representativeness and minimizing bias. This may include using stratified (by focus groups) or random sampling methods and conducting sensitivity analysis to understand how sample variability may affect conclusions.

5.3.6 Parametric Uncertainty. Parametric uncertainty² is associated with the variability inherent in the input variables of models, arising from natural or production inconsistencies that may occur. This category of uncertainty reflects the inherent *randomness or variability observed in the modeled components*, for example, the dimensions or properties of a manufactured part. This variability can cause significant differences in model performance or system behavior. The problem of parametric uncertainty lies in its irreducibility, as additional data or improved measurements cannot completely eliminate it. It is usually modeled using probabilistic methods to effectively account for this stochastic nature [9].

In project management, *parametric uncertainty* can affect project planning and execution, especially when it comes to precise specifications or quality standards. This uncertainty can impact cost estimation, resource planning, and risk management strategies. To manage parametric uncertainty, project managers can apply robust design practices, including variability analysis at the planning stages and using probabilistic modeling to predict potential impacts. By understanding and planning for parameter variability, project teams can better align execution with project requirements, ensuring improved quality control and risk mitigation, thereby increasing project resilience and efficiency.

5.3.7 Measurement Uncertainty. Measurement uncertainty refers to the inherent imprecision and inaccuracy in determining input and output variables due to the *limitations of measuring instruments and methods*. All measurements depend on unpredictable fluctuations in the measurement process itself. This category of uncertainty can be divided into two types [13]:

- *Type A uncertainty*, which is assessed using statistical methods, and

- *Type B uncertainty*, which is assessed by other means, such as assigning a probability distribution.

The main task of measurement uncertainty is to ensure the accuracy and reliability of data, which is crucial for modeling and decision-making processes [12].

In project management, *measurement uncertainty* can affect the accuracy of project estimates, quality control, and outcome evaluation. This uncertainty can lead to potential errors in data interpretation, which may result in incorrect strategies or resource allocation. To address measurement uncertainty, project managers should prioritize the use of high-quality, calibrated measuring instruments and methodologies, implement regular verification procedures, and incorporate allowable errors into estimates.

5.3.8 Experimental Uncertainty. Experimental uncertainty is the variability observed during repeated measurements under identical conditions, arising from the inherent *limitations and randomness of experimental methods and instruments*. It reflects the inevitable fluctuations in results, even when experiments are conducted multiple times with the same settings. This category of uncertainty highlights the random variability that may occur in experimental processes, making it essentially impossible to reduce through additional knowledge or improved measurements. The main issue of experimental uncertainty is to ensure that the collected data are reliable and accurately reflect the phenomena being studied, despite the limitations of the experimental setup [9].

In project management, *experimental uncertainty* can significantly affect projects that rely on testing and prototyping stages, where repeated measurements are crucial for verification and validation. To address this uncertainty, project teams should implement various experimental designs that can account for variability. This can be achieved through multiple assessments of the same function at different review meetings, allowing for a comprehensive understanding of potential variability. Additionally, incorporating statistical analyses that evaluate and account for experimental variability can help derive meaningful insights from test data.

5.3.9 Human Behavior Uncertainty. Human behavior uncertainty concerns the *unpredictable variability of human actions and decisions*, which can often be irrational, cause cognitive dissonance, or deviate from expected behavioral patterns. This type of uncertainty stems from the inherent complexity of human nature, where actions may not correspond to stated intentions or standard behavior.

² Not to be confused with “parameter uncertainty.” While both categories relate to uncertainties associated with model parameters, *parameter uncertainty* is epistemic and concerns the accuracy of known parameters, whereas *parametric uncertainty* is aleatory, dealing with the natural variability inherent in the system’s input variables.

Issues related to human behavior uncertainty include difficulties in predicting how individuals or groups will react in certain situations, which can lead to unexpected outcomes and complicate the planning and execution of strategies [10].

Human behavior uncertainty significantly affects project management, influencing team dynamics, stakeholders engagement, decision-making, and overall project execution. Discrepancies in individual behavior and decisions can result in unpredictability in project progress, potentially causing delays or conflicts. This variability prompts project managers to maintain cohesion and focus within the team, as different reactions to tasks or stress can hinder stable operation. Effective communication and leadership are crucial for mitigating these effects, as they ensure alignment and understanding despite behavioral fluctuations. Additionally, fostering a strong team environment is of great importance, as it helps reduce uncertainty arising from human interaction, ensuring that projects stay on track despite the inherent unpredictability of human behavior.

6 Depth of Uncertainty

To effectively manage uncertainty during project decision-making, it is crucial to recognize the full spectrum of uncertainty levels, ranging from the *ideal yet unattainable complete confidence and determinism* to the opposite extreme of *total ignorance and chaos*. Historically, the definition of the range of uncertainty levels from “*known knowns*” to “*unknown unknowns*,” and their challenge for decision-makers, is attributed to US Secretary of Defense Donald Rumsfeld [14]. This framework is based on philosophical and practical discourses, from ancient Greek epistemology to modern decision theory, emphasizing the complexity and breadth of uncertainties.

In this context, it is proposed to introduce a new unit of measurement for total uncertainty — *1 Trump*. Each level denotes a progressive increase in uncertainty on a scale from 0.0 to 1.0 Trump:

- *Complete confidence and determinism (0.0 Trump)*: This denotes a state where everything is known precisely, providing the basis of absolute determinism. This is an ideal practically impossible to achieve in real scenarios, but it serves as a limiting characteristic at one end of the spectrum.

- *Uncertainty Level 1 (0.0–0.2 Trump)*: This level acknowledges minor uncertainty but does not require detailed measurement. These situations typically involve short-term decisions where there is sufficient historical data to predict outcomes. They

represent simple “known unknowns” and are close to complete confidence on the Trump scale.

- *Uncertainty Level 2 (0.2–0.4 Trump)*: Here, systems and input data can be assessed probabilistically, or future scenarios can be determined with sufficient accuracy and corresponding probabilities. This level includes “known unknowns,” where risks can be quantified using probabilities, and risk management methods can be used for decision-making.

- *Uncertainty Level 3 (0.4–0.6 Trump)*: At this stage, although numerous probable future cases are recognized, exact probabilities cannot be assigned. Decisions are made using scenario analysis, exploring various possible future worlds without definitive probability, indicating increased uncertainty and, thus, a higher position on the Trump scale.

- *Uncertainty Level 4*: Divided into 4a and 4b, this level captures deep uncertainty:

- *4a (0.6–0.8 Trump)*: Many probable future events can be outlined, but the exact models and probabilities of these futures are unknown due to limited data or understanding of the mechanics.

- *4b (0.8–1.0 Trump)*: We only know that we do not know—this relates to unpredictable events, also known as “black swans,” which cannot be predicted by analyzing past data and are only recognized retrospectively [15].

- *Total ignorance and chaos (1.0 Trump)*: Representing the opposite end of the spectrum from complete confidence, this level denotes a state of complete unawareness of future possibilities or impacts, constituting total randomness, unpredictability, and chaos, where participants have no way of knowing the full extent of their ignorance.

A similar gradation scale is presented in the work “Defining Uncertainty: A Conceptual Basis for Uncertainty Management in Model-Based Decision Support” [10], where the limits from determinism to total ignorance are established. However, instead of numerical uncertainty levels, the authors proposed subjective-terminological levels with corresponding explanations: determinism, statistical uncertainty, scenario uncertainty, recognized ignorance, and total ignorance, and it is considered that this scheme of characteristics provides a complete logical structure of uncertainty levels for its analysis.

7 Justification of Relevance and Feasibility of the Research

With the increasing complexity of projects, globalization, and the radical acceleration of technological progress, uncertainty has become a critical challenge in project management. Traditional project

management information systems often rely on static models that are poorly equipped to account for real uncertainties, leading to inefficiency in dynamic project environments. It is necessary to fill this gap by employing data science methods, artificial intelligence, and quantitative uncertainty assessment to create next-generation project management information systems.

The relevance of this research is justified by:

- The *growing complexity of projects* in such fields as IT, construction, and engineering, where uncertainty significantly affects performance.
- *Technological advancements* such as artificial intelligence, machine learning, and real-time data processing, which offer new opportunities to enhance the capabilities of project management information systems.
- *Practical demand* from industries facing unpredictable project challenges that require more resilient, adaptive, and data-driven solutions for project management.

By improving the models and methods of project management information systems, this research will contribute to reducing uncertainty, enhancing decision-making, and increasing overall project success indicators, aligning with current industry needs and scientific advancements.

8 Conclusion

As project management information systems continue to evolve, academic research plays a crucial role in enhancing their capabilities to meet the demands of modern project management. By integrating artificial intelligence, advanced data analytics, and automation, future project management information systems can provide greater efficiency, accuracy, and adaptability, ultimately improving project success indicators. These research directions offer valuable contributions both to the academic knowledge base and to practical applications in real project environments.

9 Prospects for further research

The ongoing evolution of project management information systems (PMIS) represents a dynamic landscape for academic research, especially in addressing the complex challenges of modern project environments. As projects become increasingly data-intensive and dependent on advanced technologies, there is a growing demand for innovative solutions that enhance efficiency, productivity, and adaptability in PMIS.

9.1 Specific Research Questions Aimed at Reducing Uncertainty in Project Management

1. How can the current architecture of project management information systems be redesigned to improve flexibility and adaptability in managing project uncertainties, such as risks and resource availability?
2. What specific methodologies and tools can be integrated into project management information systems to enhance their ability to accurately estimate time and costs under uncertainty?
3. In what ways can predictive analytics and machine learning be utilized in project management information systems to forecast and mitigate risks and issues affecting project outcomes?
4. How do different categories of uncertainties impact project performance, and how can optimized project management information system models better distinguish and address these uncertainties?
5. What role can improved communication and stakeholder engagement within project management information systems play in reducing project uncertainties?
6. How effective are existing project management information system functions in managing uncertainty, and which critical areas require improvement to support strategic decision-making in complex projects?
7. Can case studies of past project failures due to uncertainty provide insights into specific optimizations of project management information systems that could prevent similar issues in future projects?
8. How do dynamic modeling approaches in project management information systems enhance real-time decision-making under uncertain project conditions?

Conflict of interest

The authors of this article has no conflicts of interest in writing it. There are no financial, personal, or other issues that could affect the fairness of this article. The article is entirely the researchers own work, has not been copied from any other sources, and has never been sent to any other publication for consideration.

Financing

The research was conducted without financial support.

Data availability

All data are available, either in numerical or graphical form, in the main text of the manuscript.

Use of artificial intelligence

The authors declare the use of the OpenAIGPT-4.1 artificial intelligence tool. The AI tool was used for:

1. Creating an abstract and selecting keywords.
2. Translating from Ukrainian into English.
3. Checking spelling and punctuation.

Authors' contributions

Anatolii Savin: research, data processing, interpretation of results, visualization, writing the text;
Valerii Sytnikov: scientific guidance, conceptualization, project administration, text editing.

References

1. Project Management Institute (2017). *A Guide to the PROJECT MANAGEMENT BODY OF KNOWLEDGE (PMBOK® GUIDE)*. [online] Available at: <https://trainupinstitute.com/wp-content/uploads/2022/03/Project-Management-Institute-A-Guide-to-the-Project-Management-Body-of-Knowledge-PMBOK%C2%AE-Guide%E2%80%93Sixth-Edition-Project-Management-Institute-2017.pdf>. [Accessed 17 Mar. 2026].
2. Project Management Institute (2014). *Navigating complexity : a practice guide*. Newtown Square, Pennsylvania: Project Management Institute, Inc. Available at: <https://www.pmi.org/standards/complexity>. [Accessed 17 Mar. 2026].
3. Correcting the course of capital projects Plan ahead to avoid time and cost overruns down the road. At a glance. (2013). Available at: <https://www.pwc.co.uk/assets/pdf/pwc-correcting-the-course-of-capital-projects.pdf> [Accessed 17 Mar. 2026].
4. Hubbard, D.W. (2010). *How to Measure Anything*. John Wiley & Sons. doi:<https://doi.org/10.1002/9781118983836>.
5. Gansch, R. and Adeo, A. (2020). System Theoretic View on Uncertainties. *Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE), 2015*, pp.1345–1350. doi:<https://doi.org/10.23919/date48585.2020.9116472>.
6. Gujarati, D.N. and Porter, D.C. (2009) *Basic Econometrics*. 5th Edition, McGraw Hill Inc., New York. Available at: <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1568730>. [Accessed 17 Mar. 2026].
7. Lane, D.A. and Maxfield, R.R. (2005). Ontological Uncertainty and Innovation. *Journal of Evolutionary Economics*, 15(1), pp.3–50. doi:<https://doi.org/10.1007/s00191-004-0227-7>.
8. Sullivan, T.J. (2015). *Introduction to Uncertainty Quantification. Texts in Applied Mathematics*. Cham: Springer International Publishing. doi:<https://doi.org/10.1007/978-3-319-23395-6>.
9. Kiureghian, A.D. and Ditlevsen, O. (2009). Aleatory or epistemic? Does it matter? *Structural Safety*, 31(2), pp.105–112. doi:<https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2008.06.020>.
10. Walker, W.E., Harremoës, P., Rotmans, J., van der Sluijs, J.P., van Asselt, M.B.A., Janssen, P. and Kreyer von Krauss, M.P. (2003). Defining Uncertainty: A Conceptual Basis for Uncertainty Management in Model-Based Decision Support. *Integrated Assessment*, 4(1), pp.5–17. doi:<https://doi.org/10.1076/iaij.4.1.5.16466>.
11. Tannert, C., Elvers, H.-D. and Jandrig, B. (2007). The ethics of uncertainty. In the light of possible dangers, research becomes a moral duty. *EMBO reports*, [online] 8(10), pp.892–896. doi:<https://doi.org/10.1038/sj.embor.7401072>.
12. Mena Roldán, José (2020). *Modelling Uncertainty in Black-box Classification Systems*. [online] Ub.edu. Available at: <https://diposit.ub.edu/dspace/handle/2445/173870> [Accessed 17 Mar. 2026].
13. International Organization for Standardization (2024). *ISO/IEC Guide 98-1:2024. Guide to the expression of uncertainty in measurement – Part 1: Introduction*. [online] ISO. Available at: <https://www.iso.org/standard/82708.html>. [Accessed 17 Mar. 2026].
14. Marchau V., Walker W.E., Bloemen P.J.T.M. and Popper S.W. eds., (2019). *Decision Making under Deep Uncertainty. From Theory to Practice*. [online] Cham: Springer International Publishing. doi:<https://doi.org/10.1007/978-3-030-05252-2>.
15. Nassim Nicholas Taleb (2007). *The Black Swan*. Random House. Available at: https://books.google.com.ua/books/about/The_Black_Swan.html?id=gWW4SkJm08C&redir_esc=y. [Accessed 17 Mar. 2026].

Received (Отримано) 26.09.2025

Received after revision (Отримано після доопрацювання) 17.02.2026

Accepted (Прийнято) 18.03.2026

Published (Опубліковано) 23.04.2026

Категорії невизначеності, що впливають на інформаційні системи управління проектами

Савін А. А.¹, аспірант

ORCID: <http://orcid.org/0009-0009-6641-5333>; e-mail: 9042853@as.op.edu.ua

Ситніков В. С.¹, доктор технічних наук, професор

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3229-5096>; e-mail: sitnikov@op.edu.ua;

Scopus Author ID: 57190377358

¹ Національний університет «Одеська політехніка»

Анотація: Стаття присвячена аналізу категорій невизначеності, що впливають на управління проектами. Автор розглядає онтологічну, епістемічну та алеаторну невизначеність, розкриваючи їхній вплив на різні фази життєвого циклу проекту та результати його діяльності. У роботі висвітлено обмеження сучасних інформаційних систем управління проектами (ІСУП) у подоланні невизначеностей та закладено основу для розробки більш ефективних систем та підходів до управління складними та динамічними середовищами проектів.

Ключові слова: управління проектами, невизначеність, онтологічна невизначеність, епістемічна невизначеність, алеаторна невизначеність, інформаційні системи управління проектами (ІСУП).

Цитування статті: Савін А. А., Ситніков В. С. (2026). Категорії невизначеності, що впливають на інформаційні системи управління проектами. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*, 45(121), с.44-60.
doi:<https://doi.org/10.15276/eltecs.45.121.2026.5>

About the authors (Про авторів)



Anatolii Savin, Postgraduate Student of the Department of Computer Systems, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Ave., Odesa, 65044, Ukraine.
E-mail: 9042853@as.op.edu.ua; ph.: +380 67 744 4615

Савін Анатолій Анатолійович, аспірант кафедри комп'ютерних систем, Національний університет «Одеська політехніка»; проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна.
E-mail: 9042853@as.op.edu.ua; ph.: +380 67 744 4615

ORCID: <http://orcid.org/0009-0009-6641-5333>



Valerii Sytnikov, Dr. of Technical Science, Professor, Head of the Department of Computer Systems, Institute of Artificial Intelligence and Robotics, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Ave., Odesa, 65044, Ukraine. E-mail: sitnikov@op.edu.ua

Ситніков Валерій Степанович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерних систем, Навчально-науковий інститут штучного інтелекту та робототехніки, Національний університет «Одеська політехніка»; проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна. E-mail: sitnikov@op.edu.ua

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

Визначення кількості контейнерів для твердих побутових відходів на основі динамічних демографічних даних

Ю. М. Молодожон, аспірант

ORCID: <http://orcid.org/0009-0002-1881-9498>; e-mail: 4852185@stud.op.edu.ua

Національний університет «Одеська політехніка»

Анотація. У статті у межах систем оперативного керування та віддаленого контролю мобільних платформ розглянуто проблему визначення кількості контейнерів для твердих побутових відходів в умовах динамічних демографічних змін. Показано, що використання традиційних статичних підходів до планування контейнерного господарства, які ґрунтуються на застарілих або несинхронізованих даних про чисельність населення, призводить до дисбалансу між фактичними обсягами утворення відходів та параметрами їх збирання і вивезення.

Метою дослідження є розроблення та обґрунтування підходу до інтеграції динамічних демографічних даних в організаційно-інформаційний контур керування з метою підвищення точності планування та адаптивності систем збирання і транспортування відходів. Для досягнення поставленої мети у роботі використано системний підхід, метод нормативного моделювання, елементи процесного опису та метод динамічного перерахунку параметрів керування.

Запропоновано динамічну модель інтеграції та оновлення демографічної інформації з офіційних державних і муніципальних цифрових реєстрів, яка забезпечує автоматизований перерахунок кількості контейнерів, графіків вивезення та вхідних параметрів для формування завдань оперативного управління мобільними платформами. Модель розглядається як елемент організаційно-інформаційного контуру управління та належить до класу систем підтримки прийняття рішень.

Показано, що використання актуалізованих демографічних даних дозволяє підвищити точність планування контейнерного забезпечення, виявляти причини відхилень від нормативного рівня заповнення контейнерів, оптимізувати маршрути руху мобільних платформ, зменшити експлуатаційні витрати та забезпечити адаптивність системи в умовах демографічних коливань. Отримані результати можуть бути використані для підвищення якості надання послуг у сфері поводження з побутовими відходами та подальшого розвитку інтелектуальних систем оперативного керування.

Ключові слова: мобільні платформи, маршрутизація, цифрові реєстри, оперативне керування, тверді побутові відходи, чисельність населення.

Цитування статті: Молодожон Ю. М. (2026). Визначення кількості контейнерів для твердих побутових відходів на основі динамічних демографічних даних. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*, 45(121), с.61-70.
doi:<https://doi.org/10.15276/eltecs.45.121.2026.6>

Вступ

Сучасні системи управління твердими побутовими відходами (ТПВ) функціонують в умовах динамічного міського середовища, обмежених ресурсів та підвищених вимог до екологічної ефективності. У цьому контексті особливого значення набуває застосування моделей оперативного керування та віддаленого контролю мобільних платформ, які забезпечують збір, транспортування та обробку відходів.

Одним із ключових параметрів, що безпосередньо впливає на ефективність таких систем, є

кількість контейнерів для ТПВ, яка визначає навантаження на мобільні платформи, графіки вивезення та маршрути руху. Водночас у більшості практичних реалізацій цей параметр розраховується статично - на основі нормативів і застарілих даних про чисельність населення.

В статті наведений опис динамічної моделі визначення кількості контейнерів для ТПВ, інтегрованої в систему оперативного керування та віддаленого контролю мобільних платформ, що враховує актуальні демографічні дані з офіційних джерел та інші впливові фактори [1-4].

Наукова новизна роботи полягає у запропонованні моделі інтеграції та актуалізації даних про чисельність населення як елемента інформаційного забезпечення оперативного керування мобільними платформами, що дозволяє адаптивно коригувати кількість контейнерів, графіки та маршрути вивезення ТПВ в умовах динамічних демографічних змін.

1 Мета дослідження

Метою дослідження є розроблення та обґрунтування підходу до інтеграції динамічних демографічних даних в організаційно-інформаційний контур керування систем оперативного керування і віддаленого контролю мобільних платформ з метою підвищення точності планування, адаптивності та ефективності процесів збирання і вивезення ТПВ, зокрема шляхом визначення обґрунтованої кількості контейнерів.

2 Задачі дослідження

Для досягнення поставленої мети у статті вирішуються такі задачі:

1. Проаналізувати існуючі підходи до визначення кількості контейнерів для ТПВ на основі нормативів накопичення та статичних даних про чисельність населення.
2. Обґрунтувати доцільність використання актуалізованих демографічних даних як вхідного параметра задач оперативного керування мобільними платформами.
3. Запропонувати динамічну модель інтеграції та актуалізації демографічної інформації з офіційних державних і муніципальних цифрових реєстрів.
4. Визначити місце запропонованої моделі в контурі оперативного керування та віддаленого контролю мобільних платформ як елемента системи підтримки прийняття рішень.
5. Оцінити вплив використання актуалізованих демографічних даних на планування контейнерного забезпечення, коригування маршрутів та адаптивність системи в умовах демографічних змін.

3 Теоретичні засади

У межах концепції *моделей і методів оперативного керування та віддаленого контролю мобільних платформ*, одним із ключових елементів є формування параметрів керування на основі змін зовнішнього середовища [1,10]. Загальні підходи до побудови систем оперативного керування та віддаленого контролю мобільних пла-

тформ, вимоги до інформаційного забезпечення таких систем детально розглянуті в роботі.

Для комунальної сфери таким ключовим фактором виступає **чисельність населення**, від якої безпосередньо залежить обсяг ТПВ та потреба в контейнерному забезпеченні.

Водночас в сучасних умовах державної політики України, спрямованої на цифровізацію та диджиталізацію управлінських процесів [9, 13], особливого значення набуває оцифрування й електронний облік даних про чисельність населення, місце проживання та реєстрацію громадян, а також формування й узгодження єдиних державних реєстрів. Загальнодержавне прагнення до © інтеграції таких інформаційних ресурсів зумовлює необхідність налагодження міжсистемної взаємодії для надання якісних комунальних послуг з урахуванням усієї наявної інформації, включаючи дані про внутрішньо переміщених осіб, тимчасово відсутніх та сезонних мешканців. За відсутності регулярного оновлення й синхронізації цих даних у практичній діяльності операторів може виникати суттєвий дисбаланс, за якого в одних районах спостерігається надлишок контейнерів з низьким рівнем заповнення, тоді як в інших їх дефіцит і систематичне переповнення.

Так у межах населених пунктів кількість контейнерів для збирання ТПВ традиційно визначається за нормативами накопичення відходів на одну особу, які затверджуються органами місцевого самоврядування. Ці нормативи [11, 12] встановлюють розрахункові обсяги утворення відходів і використовуються для планування контейнерного господарства та графіків вивезення. Проте фактичні дані щодо кількості мешканців у населеному пункті нерідко відрізняються від офіційних через несинхронність джерел інформації: адміністративних реєстрів, даних державної статистики, відомостей ОСББ, баз житлово-комунальних підприємств тощо.

На практиці точність таких розрахунків значною мірою залежить від достовірності даних про чисельність населення. Проте реальні значення часто не відповідають офіційним через несинхронність джерел інформації: адміністративних реєстрів територіальних громад, даних державної статистики, відомостей ОСББ, баз житлово-комунальних підприємств тощо. У результаті виникає дисбаланс між фактичним обсягом накопичення відходів і можливостями системи їх збирання [3].

Для підвищення точності планування запропоновано створення динамічної моделі інтеграції

демографічних даних, яка забезпечуватиме автоматичне оновлення розрахункової кількості контейнерів для ТПВ та графіків їх вивезення залежно від змін чисельності населення [2, 4, 6]. Ключовою особливістю моделі є використання офіційних уповноважених джерел інформації, таких як Державна служба статистики України, реєстри територіальних громад, а також державні цифрові платформи (наприклад, "Дія"). Дані мають оновлюватися з визначеною періодичністю, а система – здійснювати автоматичну верифікацію отриманих відомостей.

В основі моделі передбачено можливість адаптивного реагування на демографічні зміни, що дозволить оптимізувати структуру контейнерного господарства, зменшити транспортні витрати та підвищити рівень екологічної безпеки міського середовища [7, 8]. Такий підхід створює передумови для переходу від статичного планування, яке базується на разових розрахунках, до динамічного управління інфраструктурою збору відходів у режимі реального часу.

Таким чином, теоретичні засади моделі враховують взаємозв'язок між демографічними показниками, нормативами накопичення відходів і параметрами контейнерного забезпечення. Її реалізація відкриває можливість інтеграції з інформаційними системами оперативного керування, що стане основою для побудови сучасних цифрових екосистем у сфері комунальних послуг.

Для вирішення цієї проблеми запропоновано **створення динамічної моделі інтеграції даних**, яка в автоматизованому режимі оновлює розрахункову кількість контейнерів і графіки вивезення відходів відповідно до актуальної чисельності населення, отриманої з уповноважених джерел. Така модель розглядається як складова системи оперативного керування мобільними платформами (зокрема, сміттєвозами), що виконують функції збирання та транспортування ТПВ.

4 Методологічні підходи

У межах даної роботи використано комплекс взаємопов'язаних моделей та методів, що відповідають концепції оперативного керування мобільними платформами. Методологічною основою дослідження є системний підхід, який дозволяє розглядати процес надання послуг з вивезення твердих побутових відходів як складну динамічну систему з множиною взаємопов'язаних елементів, інформаційних потоків та зворотних зв'язків.

Опис взаємодії суб'єктів, джерел даних та послідовності управлінських дій ґрунтується на процесній моделі, що може бути формалізована

засобами BPMN або UML-діаграм активностей. При цьому модель актуалізації чисельності населення розглядається як окремий інформаційний підпроцес у загальному контурі керування.

З точки зору логістичного забезпечення, запропонований підхід містить елементи динамічних моделей типу Vehicle Routing Problem (VRP), оскільки зміна кількості контейнерів та рівня їх наповнення безпосередньо впливає на структуру маршрутів, частоту обслуговування та навантаження на мобільні платформи.

Крім того, модель може бути віднесена до класу систем підтримки прийняття рішень (Decision Support Systems), оскільки забезпечує формування аналітичної інформації та рекомендацій для оператора щодо коригування кількості контейнерів, графіків і маршрутів без повної автоматизації управлінських рішень.

Розрахунок необхідної кількості контейнерів для твердих побутових відходів повинен ґрунтуватися на поєднанні демографічних, нормативних та технічних параметрів. У традиційній практиці ці показники визначаються вручну, на основі статистичних даних і встановлених норм. Проте в умовах цифрової трансформації комунального господарства доцільним є формування **автоматизованої розрахункової моделі**, яка динамічно реагує на зміни чисельності населення та обсягів відходів.

Для визначення обсягів накопичення ТПВ на основі затверджених нормативів на одну особу та формування базових розрахункових залежностей використовується **метод нормативного моделювання**.

Основою методології є залежність кількості контейнерів K від кількох ключових параметрів:

- чисельності населення P ,
- норми накопичення відходів на одну особу N_p ,
- місткості одного контейнера V_s ,
- частоти вивезення (кількості спорознь на добу або тиждень, F).

Загальна формула розрахунку має вигляд:

$$K = \frac{P \cdot N_p}{V_s \cdot F}$$

де K - розрахункова кількість контейнерів, необхідних для обслуговування певної території;

P - чисельність населення, що проживає в межах відповідного району або об'єкта обслуговування;

N_p - норма накопичення ТПВ на одну особу ($\text{м}^3/\text{добу}$);

V_s - об'єм контейнера (м^3);

F - кількість циклів вивезення за одиницю часу (наприклад, разів на добу).

Залежно від одиниць вимірювання може вводитися коефіцієнт перерахунку k_1 , що забезпечує узгодження між масовими та об'ємними показниками.

У разі наявності оперативного доступу до офіційних демографічних даних (P) модель може виконувати автоматичний перерахунок кількості контейнерів з певною періодичністю - наприклад, раз на квартал або після кожного оновлення реєстрових даних. Це дозволяє своєчасно реагувати на демографічні зміни: міграційні потоки, появу нової житлової забудови, зміну кількості зареєстрованих мешканців.

Додатково в модель можуть бути включені коригувальні коефіцієнти:

- k_2 - коефіцієнт сезонних коливань (наприклад, у курортних або студентських містах);
- k_3 - коефіцієнт щільності забудови (для відображення різниці між приватним сектором і багатоповерховими районами);
- k_4 - коефіцієнт похибки у випадку неповних або неточних даних.

Тоді розширена формула набуває вигляду:

$$K = \frac{P \cdot N_p \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4}{V_s \cdot F}$$

Для автоматичного оновлення кількості контейнерів і пов'язаних параметрів у разі зміни чисельності населення або періодичності вивезення застосовується **метод динамічного перерахунку параметрів**.

Розроблена модель передбачає створення **модуля автоматичного оновлення даних**, який взаємодіє з базами демографічної інформації через API-інтерфейси або офіційні відкриті дані. Оновлення відбувається у визначений проміжок часу, після чого система виконує автоматичний перерахунок кількості контейнерів і формує аналітичний звіт для диспетчерського центру або відповідального оператора.

Застосування такої методики дозволяє мінімізувати вплив людського фактору, забезпечити узгодженість показників, а також досягти **адаптивного планування контейнерного господарства** відповідно до реальної демографічної ситуації [3, 5, 6].

Для оцінювання впливу можливих змін чисельності населення (міграція, сезонні коливання, тимчасове переміщення осіб) на параметри контейнерного забезпечення та навантаження на мобільні платформи застосовується **метод сценарного аналізу**.

5 Модель оперативного керування та віддаленого контролю мобільних платформ

5.1 Загальна характеристика моделі

Запропонована модель описує процес оперативного керування мобільними платформами, що виконують завдання у сфері поведження з ТПВ, з урахуванням динамічних змін умов середовища, обмеженості ресурсів та вимог до екологічної ефективності. Основна мета моделі - забезпечення адаптивного розподілу маршрутів руху мобільних об'єктів (сміттєвозів) і своєчасного збору даних із сенсорних пристроїв, встановлених у контейнерах для відходів.

Модель базується на поєднанні **бізнес-процесного підходу (BPMN)** для опису логіки взаємодії елементів системи, **динамічної моделі маршрутизації (DVRP)** для оптимізації руху мобільних платформ та **агентно-орієнтованої структури** для моделювання поведінки окремих компонентів системи (контейнерів, транспортних засобів, диспетчерського центру).

5.2 Структура моделі

Модель складається з таких основних підсистем:

- Підсистема збору даних - сенсори рівня заповнення контейнерів, GPS-модулі та RFID-зчитувачі, розташовані на транспортних засобах.
- Підсистема передачі даних - використання каналів мобільного зв'язку для передавання телеметрії у диспетчерський центр у режимі реального часу.
- Підсистема обробки даних - сервер аналітики, який виконує агрегацію даних, розрахунок станів заповнення контейнерів, формування пріоритетів обслуговування.
- Підсистема прийняття рішень - алгоритми оптимізації маршрутів на основі DVRP-моделі з урахуванням поточних станів контейнерів, відстаней, часу доби та транспортної ситуації.
- Інтерфейс управління - візуалізація стану системи для диспетчерів та операторів.

5.3 Формалізація моделі

Процес оперативного керування можна представити як задачу динамічної маршрутизації транспортних засобів:

$$\min \sum_{i=1}^n C_i(R_i, t)$$

де C_i - витрати на виконання маршруту R_i у момент часу t ;

R_i - множина точок обслуговування (контей-

нерів), що входять до маршруту i -го транспортного засобу;

t - момент часу, коли здійснюється оптимізація. Додатково враховується обмеження:

$$V_i(t) \leq V_{max}, \quad S_i(t) \leq S_{limit},$$

де $V_i(t)$ - поточний обсяг зібраних відходів,
 $S_i(t)$ - запас пального/наповненість бункеру або ресурс часу.

5.4 Взаємодія агентів

У моделі виділяються три типи агентів: **Контейнер-агент** - генерує сигнали про стан заповнення.

- **Мобільна платформа-агент** - приймає завдання, рухається по маршруту, передає дані про місцезнаходження.

- **Диспетчер-агент** - координує взаємодію, виконує оптимізацію та реагує на зміни середовища.

Агентно-орієнтована структура дозволяє врахувати непередбачувані події (зміна трафіку, несправність, нові запити), забезпечуючи адаптивність системи.

5.5 Візуалізація процесів

Для формалізації взаємодії між підсистемами та підтримки процесів прийняття управлінських рішень у системах оперативного керування мобільними платформами доцільно використовувати поєднання процесних і функціональних моделей.

Зокрема, застосовуються:

- UML-діаграми активностей - для відображення логіки обробки та трансформації демографічних, нормативних і телеметричних даних у межах окремих функціональних модулів;

- BPMN-модель бізнес-процесу - для представлення узагальненого циклу функціонування системи «збір даних → аналіз → формування управлінських альтернатив → прийняття рішення → виконання → контроль результатів».

У межах запропонованого підходу зазначені процесні моделі доповнюються елементами системи підтримки прийняття рішень (Decision Support System, DSS), яка забезпечує інтеграцію даних з різномірних джерел, виконання аналітичних розрахунків та формування рекомендацій для оператора. DSS не здійснює автоматичного керування мобільними платформами, а виконує функцію інтелектуальної підтримки, надаючи обґрунтовані варіанти коригування параметрів контейнерного забезпечення, графіків вивезення та маршрутів обслуговування.

Таким чином, візуалізація процесів охоплює не лише послідовність дій, а й функціональну структуру DSS, взаємодію її аналітичних, інформаційних та інтерфейсних компонентів з оператором і системою оперативного керування. Узагальнену логіку функціонування системи підтримки прийняття рішень у контурі оперативного керування мобільними платформами наведено на рис. 1.

На функціональній схемі системи підтримки прийняття рішень зображено логіку аналітичної обробки демографічних та експлуатаційних даних у процесі формування управлінських рішень щодо контейнерного забезпечення та режимів роботи мобільних платформ.



Рис. 1 - Функціональна схема системи підтримки прийняття рішень (DSS)

Схема відображає послідовність функціональних етапів, починаючи з надходження актуалізованих демографічних даних з уповноважених державних і муніципальних реєстрів, їх верифікації та узгодження, після чого здійснюється аналітична обробка відповідно до чинних нормативів накопичення відходів.

У межах аналітичного модуля виконується розрахунок необхідної кількості контейнерів, оцінювання відхилень між розрахунковими та фактичними параметрами експлуатації, а також формування рекомендацій щодо коригування кількості контейнерів, графіків вивезення та навантаження на мобільні платформи.

Окремо на схемі виділено роль оператора (диспетчера), який здійснює розгляд сформованих рекомендацій та приймає остаточне управлінське рішення. Прийняті рішення передаються до системи оперативного керування мобільними платформами для їх практичної реалізації.

Таким чином, схема відображає функціональну структуру DSS як інструмента підтримки прийняття рішень у контурі оперативного керування та віддаленого контролю мобільних платформ без деталізації конкретних алгоритмів оптимізації.

5.6 Практичне значення моделі

Реалізація такої моделі дозволяє:

- зменшити витрати часу та пального завдяки оптимізації маршрутів;
- забезпечити прозорість контролю процесів збору ТПВ;
- створити базу для впровадження інтелектуальних сервісів і прогнозування навантаження;
- підвищити екологічну результативність міських систем управління відходами.

6 Інтеграція моделі в систему оперативного керування мобільними платформами

Динамічна розрахункова модель визначення кількості контейнерів використовується для формалізованого опису залежності між чисельністю населення, нормативами накопичення відходів і параметрами контейнерного господарства. Модель має часову залежність та дозволяє автоматично оновлювати результати розрахунків у разі зміни вхідних параметрів.

Запропонована модель не є ізольованою, а інтегрується в загальну систему оперативного керування та віддаленого контролю мобільних платформ (сміттєвозів).

Запропонована модель розглядається не як самостійний інструмент планування, а як джере-

ло актуалізованих вхідних параметрів для моделей оперативного керування мобільними платформами, що визначають режими роботи, маршрути та навантаження транспортних засобів.

Зміна кількості контейнерів безпосередньо впливає на:

- графіки виїздів транспортних засобів;
- кількість контейнерів на маршрутах;
- періодичність вивозу;
- маршрути руху;
- навантаження на кожен мобільну платформу;
- витрати часу та пального.

На рис. 2 представлено узагальнену структурну схему визначення та періодичної актуалізації кількості контейнерів для твердих побутових відходів як елемента організаційного контуру оперативного керування мобільними платформами. Процес ініціюється отриманням демографічних даних з державних і муніципальних цифрових реєстрів, після чого здійснюється їх верифікація та агрегування з метою усунення неузгодженостей між різними джерелами інформації [14, 15].

На основі актуалізованих даних виконується розрахунок необхідної кількості контейнерів відповідно до чинних нормативів накопичення відходів, а також аналіз відхилень фактичного рівня заповнення контейнерів від нормативних значень. За результатами аналізу формується управлінське рішення щодо коригування параметрів обслуговування, зокрема графіків вивезення та маршрутів руху мобільних платформ.

Подальше виконання рішень супроводжується віддаленим контролем із використанням даних GPS-моніторингу та телеметрії, а також інформації від сенсорів заповнення контейнерів. Отримані зворотні дані використовуються для оцінки ефективності прийнятих рішень, накопичення статистики та подальшої актуалізації параметрів моделі, що забезпечує адаптивність системи оперативного керування в умовах змінної чисельності населення та нерівномірного утворення відходів.

Модель інтеграції даних з уповноважених джерел надає можливість взаємодії між демографічними реєстрами, інформаційними системами оператора та диспетчерським центром у межах єдиного інформаційного контуру управління.

Зміна параметрів контейнерного забезпечення формує нові вхідні умови для задач маршрутизації мобільних платформ, у тому числі їх динамічних варіантів, що розглядаються в межах систем оперативного керування.



Рис. 2 - Структурна схема інтеграції демографічних даних у систему оперативного керування та віддаленого контролю мобільних платформ.

Система віддаленого контролю, що використовує GPS-моніторинг і телеметричні дані, забезпечує зворотний зв'язок між фактичним станом контейнерів і результатами розрахунків моделі [1, 3, 6]. Таким чином реалізується **адаптивний контур керування**, характерний для сучасних моделей оперативного управління.

Запропонована модель розглядається не як самостійний інструмент планування, а як джерело актуалізованих вхідних параметрів для моделей оперативного керування мобільними платформами, що визначають режими роботи, маршрути та навантаження транспортних засобів.

Запропонований підхід може використовуватися як інструмент контролю відповідності фактичних умов нормативним показникам надання послуги.

7 Формалізація процесу управління

Організаційно-функціональна модель оперативного керування мобільними платформами застосовується для опису процесів прийняття рішень щодо коригування кількості контейнерів, графіків вивезення та навантаження на мобільні платформи на основі актуальних даних про чисельність населення.

Оперативність запропонованого підходу полягає не лише у зміні кількості контейнерів як фізичних об'єктів, а й у можливості швидкого коригування режимів обслуговування без втручання в інфраструктуру.

Модель відображає взаємозв'язок між демографічними показниками, контейнерною інфраструктурою та транспортними ресурсами без деталізації конкретних алгоритмів оптимізації.

Процес функціонування моделі може бути представлений у вигляді BPMN- або UML-діаграми активностей і включає такі етапи:

1. Отримання актуальних демографічних даних.
2. Верифікація та агрегування інформації.
3. Розрахунок кількості контейнерів.
4. Аналіз відхилень від поточних параметрів.
5. Формування управлінських рішень щодо графіків і маршрутів мобільних платформ.
6. Контроль виконання та накопичення статистики.

У контексті дисертаційного дослідження модель відноситься до **організаційних моделей оперативного керування**, що описують процеси прийняття рішень без деталізації конкретних алгоритмів оптимізації.

Висновки

Використання актуалізованої та інтегрованої інформації про чисельність і структуру населення, у тому числі з урахуванням тимчасово переміщених осіб та тимчасово відсутніх громадян, дає змогу пояснити причини відхилень від нормативного рівня заповнення контейнерів у окремих локаціях. Зокрема, відсутність або надлишок фактичного навантаження на контейнери не завжди свідчить про помилки в організації вивезення відходів, а може бути наслідком використання застарілих або неповних демографічних даних. Застосування такої інформації в межах запропонованої моделі дозволяє не лише отримати більш глибоке розуміння процесів надання послуги з управління побутовими відходами в цілому, але й забезпечує можливість оперативного коригу-

вання маршрутів збирання, оптимізації графіків обслуговування контейнерних майданчиків та прогнозування подальших коливань обсягів накопичення відходів. У свою чергу, це створює підґрунтя для підвищення якості послуги та використання моделі як інструменту контролю відповідності фактичних показників нормативним вимогам і прийнятим управлінським рішенням.

У статті запропоновано модель визначення кількості контейнерів для ТПВ на основі динамічних демографічних даних, враховуючи коефіцієнт сезонності, інтегровану в систему оперативного керування та віддаленого контролю мобільних платформ.

Показано, що використання актуальних даних про чисельність населення дозволяє підвищити точність планування контейнерного господарства, оптимізувати роботу мобільних платформ та зменшити експлуатаційні витрати.

Запропонований підхід створює методологічну основу для подальших досліджень у напрямі інтеграції прогнозних моделей, сенсорних систем та інтелектуальних засобів підтримки прийняття рішень у комунальній сфері для забезпечення надання якісної послуги населенню, враховуючи державну політику України, спрямовану на цифровізацію та оцифрування управлінських процесів.

Наукова новизна роботи полягає у формалізації динамічної моделі визначення кількості контейнерів для ТПВ як елемента організаційного контуру оперативного керування мобільними платформами, що базується на інтеграції та періодичній актуалізації демографічних даних з державних і муніципальних цифрових реєстрів та забезпечує адаптацію параметрів системи без зміни її фізичної структури.

Конфлікт інтересів

Автор цієї статті заявляє про відсутність конфлікту інтересів щодо цього дослідження, включаючи фінансові, особисті, авторські чи будь-які інші, які могли б вплинути на дослідження, а також на результати, представлені в цій статті.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Наявність даних

Усі дані доступні в числовій або графічній формі в основному тексті дослідження.

Використання штучного інтелекту

Автор підтверджує, що він використовував технології штучного інтелекту для пошуку та огляду загальнодоступної інформації. Під час підготовки статті використовувалися цифрові інструменти для мовностилістичного редагування та структуризації тексту. Науковий зміст, модель, методологія та висновки є результатом авторського дослідження.

Внесок автора

Автором самостійно сформульовано наукову ідею дослідження, розроблено концепцію та структуру статті, визначено та застосовано методи дослідження, виконано формалізацію моделі інтеграції динамічних демографічних даних у систему оперативного керування мобільними платформами та сформульовано висновки.

References

1. Molodozhon, Y., Sytnikov, V. and Vodichev, V. (2025). Models and Methods of Operational Control and Remote Monitoring of Mobile Platforms. *Electrical and Computer Systems*, 44(120), pp.29–41. doi:<https://doi.org/10.15276/eltecs.44.120.2025.4>.
2. Ferrer, J. and Alba, E. (2019). BIN-CT: Urban waste collection based on predicting the container fill level. *Biosystems*, 186(10), p.103962. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biosystems.2019.04.006>.
3. Ghahramani, M., Zhou, M., Molter, A. and Pilla, F. (2022). IoT-based Route Recommendation for an Intelligent Waste Management System. *IEEE Internet of Things Journal*, 9(14), pp. 11883 - 11892. doi:<https://doi.org/10.1109/jiot.2021.3132126>.
4. Nesmachnow, S., Rossit, D. and Moreno-Bernal, P. (2025). A Literature Review of Recent Advances on Innovative Computational Tools for Waste Management in Smart Cities. *Urban Science*, 9(1), 16. doi:<https://doi.org/10.3390/urbansci9010016>.
5. Likotiko, E.D., Nyambo, D. and Mwangoka, J. (2017). Multi-Agent Based IoT Smart Waste Monitoring and Collection Architecture. *International Journal of Computer Science, Engineering and Information Technology*, 7(5), pp.01-14. doi:<https://doi.org/10.5121/ijcseit.2017.7501>.

6. Maciel, R. R., de Souza, A. D., Almeida, R. M. A. and Leite, J. P. R. R. (2025). The impact of IoT-enabled routing optimization on waste collection distance: A systematic review. *Logistics*, 9(4), 161. doi:<https://doi.org/10.3390/logistics9040161>
7. Ferronato, N. and Torretta, V. (2019). Waste mismanagement in developing countries: A review of global issues. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, [online] 16(6), p.1060. doi:<https://doi.org/10.3390/ijerph16061060>.
8. Batty, M. (2018). *Inventing future cities*. Cambridge, Massachusetts: The Mit Press. ISBN 9780262038959.
9. European Commission. (2020). *A European strategy for data. A European strategy for data*. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52020DC0066> [Accessed 27 Mar. 2026].
10. Kitchenham (2007). *Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering*. [online] Available at: https://www.elsevier.com/_data/promis_misc/525444systematicreviewsguide.pdf [Accessed 27 Mar. 2026].
11. Kitsoft (2024). *Ministry of Community and Territorial Development of Ukraine (Міністерство розвитку громад та територій України)*. [online] Mindev.gov.ua. Available at: <https://mindev.gov.ua/diialnist/napriamy/sfera-komunalnykh-poslugh/upravlinnia-pobutovymy-vidkhodamy> [Accessed 27 Mar. 2026].
12. Stat.gov.ua. (2024). *Search results | State Statistics Service of Ukraine: Demographic statistics and population registers. (Результати пошуку | Державна служба статистики України: Демографічна статистика та реєстри населення)*. [online] Available at: <https://stat.gov.ua/uk/search?query=%D0%94%D0%B5%D0%BC%D0%BE%D0%B3%D1%80%D0%B0%D1%84%D1%96%D1%87%D0%BD%D0%B0+%D1%81%D1%82%D0%B0%D1%82%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0+%D1%82%D0%B0+%D1%80%D0%B5%D1%94%D1%81%D1%82%D1%80%D0%B8+%D0%BD%D0%B0%D1%81%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F+%282024%29> [Accessed 27 Mar. 2026].
13. OECD (2019). *The Path to Becoming a Data-Driven Public Sector. OECD Digital Government Studies*. OECD. doi:<https://doi.org/10.1787/059814a7-en>.
14. Hyman, M., Turner, B. and Carpintero, A. (2015). *Guidelines for National Waste Management Strategies*. [online] UN. Available at: <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/8669>. [Accessed 27 Mar. 2026].
15. Iso.org. (2024). *ISO 37120:2018. Sustainable cities and communities - Indicators for city services and quality of life*. Available at: <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:37120:ed-2:v1:en>. [Accessed 27 Mar. 2026].
16. Wikipedia Contributors (2019). *Smart city*. [online] Wikipedia. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Smart_city. [Accessed 27 Mar. 2026].
17. Wikipedia (2024). *Internet of things*. [online] Wikipedia. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Internet_of_Things. [Accessed 27 Mar. 2026].

Отримано (Received) 23.12.2025

Отримано після доопрацювання (Received after revision) 26.02.2026

Прийнято (Accepted) 27.03.2026

Опубліковано (Published) 23.04.2026

Determining the Number of Solid Waste Containers Based on Dynamic Demographic Data

Yurii Molodozhon, *postgraduate student*

ORCID: <http://orcid.org/0009-0002-1881-9498>; e-mail: 4852185@stud.op.edu.ua
Odesa Polytechnic National University

Abstract. *The article, within the framework of operational management systems and remote control of mobile platforms, considers the problem of determining the number of containers for solid household waste in conditions of dynamic demographic changes. It is shown that the use of traditional static approaches to planning a container economy, which are based on outdated or unsynchronized data on the population, leads to an imbalance between the actual volumes of waste generation and the parameters of their collection and removal.*

The purpose of the study is to develop and substantiate an approach to integrating dynamic demographic data into the organizational and information management circuit in order to increase the accuracy of planning and adaptability of waste collection and transportation systems. To achieve this goal, the work uses a systems approach, a normative modeling method, elements of process description, and a method of dynamic recalculation of control parameters.

A dynamic model of integration and updating of demographic information from official state and municipal digital registers is proposed, which provides automated recalculation of the number of containers, removal schedules and input parameters for the formation of tasks for the operational management of mobile platforms. The model is considered as an element of the organizational and informational control circuit and belongs to the class of decision support systems.

It is shown that the use of updated demographic data allows to increase the accuracy of container supply planning, to identify the causes of deviations from the normative level of container filling, to optimize the routes of mobile platforms, to reduce operating costs and to ensure the adaptability of the system in conditions of demographic fluctuations. The results obtained can be used to improve the quality of service provision in the field of household waste management and the further development of intelligent operational management systems.

Keywords: *mobile platforms, routing, digital registers, operational management, solid household waste, population.*

Article citation: Molodozhon Yu. M., (2026). Determining the number of solid waste containers based on dynamic demographic data. *Electrotechnic and Computer Systems*, 45(121), pp.61-70. doi:<https://doi.org/10.15276/eltecs.45.121.2026.6>

Про автора (About the author)



Молодожон Юрій Михайлович, аспірант кафедри комп'ютерних систем, Національний університет «Одеська політехніка»; просп. Шевченка, 1, м. Одеса, 65044, Україна.
E-mail: 4852185@stud.op.edu.ua; 0674852185

Yurii Molodozhon, postgraduate student of the Department of Computer Systems, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Ave., Odesa, 65044, Ukraine.
E-mail: 4852185@stud.op.edu.ua; 0674852185

ORCID: <http://orcid.org/0009-0002-1881-9498>

Дослідження термохімічної конверсії органічних речовин у комбінованому газогенераторі

О. І. Брунеткін¹, доктор технічних наук, професор

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6701-8737>; e-mail: brunetkin@op.edu.ua;
https://www.researchgate.net/profile/Olexander_Brunetkin

Є. Г. Філіппов¹, аспірант

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9034-176X>; e-mail: 10488154@stud.op.edu.ua

А. М. Іванєєв¹, аспірант

ORCID: <http://orcid.org/0009-0001-7618-3769>; e-mail: 10161115@stud.op.edu.ua

В. В. Тафій¹, студент магістратури

ORCID: <http://orcid.org/0009-0004-6556-8964>; e-mail: n-nait@ukr.net

¹ Національний університет «Одеська політехніка»

Анотація. У статті розглядається модель рівноважних хімічних процесів у комбінованому газогенераторі. Залежно від складу та вологості вихідної деревної сировини розраховуються параметри та склад газової суміші, що утворюється під час роботи комбінованого газогенератора запропонованої схеми. Порівняння результатів розрахунків з даними експериментальних досліджень показало, що запропонована модель адекватно відтворює перебіг процесів газифікації та піролізу.

Запропонована модель газифікації деревної сировини з використанням кисневого дуття дозволяє розширити перелік можливих хімічних реакцій, відкриває перспективу дослідження в єдиному методологічному підході до процесів горіння, піролізу та газифікації. В рамках цієї моделі можуть враховуватися різні окислювачі: повітря, кисень, пароповітряне, парокисневе та парове дуття, а також різні способи подачі додаткової зовнішньої енергії: через огороджувальні конструкції (теплообмінники) або разом з паровим дуттям.

Подальший розвиток та деталізація моделі призведе до збільшення кількості нелінійних алгебраїчних рівнянь, що описують хімічні процеси в комбінованому газогенераторі, відповідно, до ускладнення процедури їх розв'язання, але забезпечить більш повний та точний опис реальних процесів у комбінованих газогенераторах.

Ключові слова: термохімічна конверсія, органічна речовина, рівноважна модель, кисневе дуття, комбінований газогенератор.

Цитування статті: Брунеткін О. І., Філіппов Є. Г., Іванєєв А. М., Тафій В. В. (2026) Дослідження термохімічної конверсії органічних речовин у комбінованому газогенераторі. Електротехнічні та комп'ютерні системи, 45(121), с.71-81. doi:<https://doi.org/10.15276/eltecs.45.121.2026.7>

Вступ

У найширшому сенсі під піролізом розуміють розкладання будь-яких сполук на складові менш важкі молекули або хімічні елементи під дією підвищеної температури. У широкому сенсі під піролізом розуміють високотемпературний термоліз органічних сполук. У вузькому сенсі — розкладання органічних природних сполук при відсутності або нестачі кисню (деревини, відхо-

дів сільськогосподарського виробництва, органічної частини побутових відходів, нафтопродуктів та іншого). Наявність в процесі піролізу обмеженої кількості кисню (перш за все в складі повітря) призводить до підвищеного виходу газової фази за рахунок зменшення вуглецевого залишку в процесі його газифікації або, навіть, до повної газифікації вихідних органічних речовин (за винятком їх мінеральної складової). Такі пристрої відносяться до газогенераторів.

© Брунеткін О. І., Філіппов Є. Г., Іванєєв А. М., Тафій В. В., 2026

Ця стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk>)

Додавання в процесі газогенерації в реакційну зону пари води призводить до збільшення в газовій фазі частки синтезу газу. Така газова суміш є привабливою з точки зору енергетичної цінності, з точки зору використання в якості вихідної сировини для хімічного синтезу, зручною для транспортування (трубопроводи), з позицій зменшення навантаження на навколишнє середовище внаслідок можливості переробки органічних відходів. Перераховані можливі позитивні сторони процесу газогенерації є основою для актуалізації розробки раціональних схем газогенераторів з наддувом киснем, повітрям або повітрям, збагаченим киснем.

1 Аналіз літературних даних і постановка проблеми

За час існування газогенераторів інтерес до їх застосування неодноразово відроджувався — в різні періоди і з різних причин.

Спочатку газогенератори створювалися для отримання горючих газів з деревини, деревного вугілля та низькоякісного палива, такого як торф. Отримані гази використовувалися як енергоносії в технологічних процесах і як паливо для перших двигунів внутрішнього згорання.

У наш час інтерес до технологій газифікації знову зростає. Цьому сприяють дві основні причини: по-перше, зростання споживання вуглеводневої сировини при одночасному скороченні її запасів і підвищенні цін; по-друге, швидке накопичення побутових і промислових відходів органічного походження. Газифікація таких відходів не тільки забезпечує додаткове отримання горючих газів і хімічної сировини, але й істотно знижує обсяг і шкідливість відходів.

За роки розвитку газогенераторів було створено безліч їх конструкцій. Кожна нова схема прагнула усунути недоліки попередніх, однак при цьому неминуче виникали й нові проблеми.

Процеси газифікації органічних речовин поділяються на дві основні групи:

1. газифікація в псевдозрідженому (киплячому) шарі;
2. газифікація у щільному шарі.

Установки з псевдозрідженим шаром [1] відрізняються значно більшою потужністю - вони здатні розвивати теплову продуктивність, що перевершує установки щільного шару десять і більше разів. Однак такі системи мають і суттєві недоліки. Одержуваний газ містить багато смол і золи, тому вимагає додаткового очищення. Крім того, до вихідної сировини висуваються суворі вимоги – необхідно забезпечити однаковий розмір частинок та низьку вологість.

Робота на знижених потужностях неможлива, оскільки підтримки киплячого шару потрібно постійний потік дуття певного обсягу. Конструкція установок складна, що потребує висококваліфікованого обслуговування. Також виникають логістичні труднощі: для установок потужністю 100 МВт і вище потрібна велика кількість сировини, і її доставка (наприклад, сільськогосподарських відходів) стає витратним та організаційно складним завданням.

Установки, що працюють за принципом газифікації в щільному шарі, зазвичай мають теплову потужність у межах 3–5 МВт, чого достатньо більшості виробничих потреб. Їх використання вирішує логістичні проблеми, оскільки потрібна менша кількість сировини. Ці пристрої з'явилися раніше за інші типи газогенераторів і відрізняються простотою конструкції та експлуатації.

Однак і вони мають недоліки. У газогенераторах (ГГ) щільного шару термічна конверсія органічних речовин відбувається у результаті трьох взаємозалежних процесів — піролізу, газифікації та горіння. Схеми роботи таких установок відрізняються напрямом руху сировини та продуктів реакції, а також послідовністю перебігу зазначених процесів.

Найбільш поширеним типом є газогенератор прямої дії. Він простий та надійний, стійкий до змін навантаження та здатний працювати на сировину з високою вологістю (до 60%). Завдяки цим перевагам такі генератори використовують і сьогодні [2].

Основним їх недоліком є зустрічний рух потоків: сировина подається зверху, а продукти газифікації рухаються знизу нагору. Це призводить до утворення великої кількості смол у верхній частині генератора де відбувається піроліз. Внаслідок цього одержуваний газ містить багато домішок, що робить його непридатним для транспортування та обмежує використання - він може спалюватися лише поблизу місця вироблення або вимагає дорогого очищення.

Іншим типом установок, що належать до групи газифікації в щільному шарі, є газогенератор зворотної дії [3]. У ньому протікають самі основні процеси — піроліз, горіння і відновлення, — але у іншому порядку. Сировина подається зверху і рухається вниз під дією сили тяжіння, а газоподібні продукти реакції спрямовуються в тому самому напрямку.

У верхній частині установки відбувається піроліз, у якому утворюється значна кількість смол. Потім продукти проходять через зони горіння та відновлення з високими температурами,

де смоли згоряють або розкладаються на прості з'єднання. Завдяки цьому вміст смол у кінцевому газі в десятки та сотні разів нижчий, ніж у газогенераторів прямої дії. Очищення газу або потребує мінімальних витрат, або зовсім не потрібне, що розширює можливості його використання.

Тим не менш, такі установки мають і недоліки. Їх конструкція складніша, ніж у генераторів прямої дії, а до вихідної сировини пред'являються підвищені вимоги — вологість не повинна перевищувати 25%. Крім того, газогенератори зворотної дії чутливі до зміни навантаження та мають нижчий коефіцієнт корисної дії.

З метою об'єднати переваги газогенераторів прямої та зворотної дії була розроблена схема газогенератора поперечного процесу [3]. Його основною перевагою є можливість роботи на малих потужностях. Однак через низьку ефективність і високий вміст смол в газі такі установки не отримали широкого застосування.

Враховуючи переваги та недоліки існуючих схем, у Фінляндії було запропоновано технологію газифікації "ENTIMOS" [4]. У ній використовується газогенератор прямої дії, але відбір горючих газів здійснюється із двох зон:

- після області горіння та газифікації, до зони піролізу, де вміст смол мінімальний;
- у верхній частині, після піролізу.

Такий підхід дозволяє отримувати частину газу з низьким вмістом смол, але при цьому обмежує можливість регулювання об'єму та складу газу. Крім того, при зміні властивостей вихідної сировини зміщуються межі відбору, що впливає на склад кінцевих продуктів.

Ідея, закладена в технології "ENTIMOS", використовується і в установках із киплячим шаром при двоступінчастій газифікації. Прикладом такої реалізації є газогенератори SilvaGas [5] і двоступінчастий газогенератор фірми Chogen [6]. Незважаючи на те, що цей підхід не повністю усуває недоліки газифікації в киплячому шарі, він відображає тенденцію до просторового поділу зон піролізу і горіння для підвищення якості одержуваного газу.

В [7] представлена схема комбінованого газогенератора, в якій об'єднані переваги установок щільного шару прямої дії. Така конструкція забезпечує можливість регулювання продуктивності у широкому діапазоні, допускає використання сировини з високою вологістю та не потребує ретельної фракційної підготовки.

Як і в зворотних газогенераторах, тут можна отримувати газ із низьким вмістом смол. При цьому, за аналогією з технологією SilvaGas, реалізовано принцип двоступінчастої газифікації -

зони піролізу і горіння розділені в просторі. Додатково передбачено рекуперацію тепла: частина енергії продуктового газу повертається в зону реакції. Однак у роботі [7] цю концепцію представлено лише як важлива схема, без практичної реалізації.

Підвищення за сучасних умов інтересу до використання ГГ за відсутності консенсусу щодо кращої схеми визначає актуальність подальшої розробки схем пристроїв газогенерації.

2 Мета та задачі дослідження

Метою даного дослідження є створення методу визначення складу газової суміші, що утворюється при роботі комбінованого газогенератора в залежності від складу і вологості вихідної сировини.

Для реалізації поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- побудувати модель процесу газогенерації в комбінованому газогенераторі при відомому складі вихідних вуглеводневих компонентів;
- розробити на основі цієї моделі методику розрахунку складу продуктів реакції у вигляді суміші газів.

3 Модель і метод дослідження

Схема установки (рис. 1) прийнята у вигляді, поданому в [7].

Принцип роботи газогенератора.

На рисунку 1 показано принципову схему газогенератора, запропонованого для розгляду. Конструкція корпусу включає дві взаємозалежні частини. У першій (позначеній як 1a) розміщується зона горіння і газифікації, а в другій (1b) — зона піролізу.

Вихідне паливо подається з бункера 2 через клапан 3 в зону піролізу. В процесі піролізу утворюються газоподібні продукти, які за допомогою вентилятора (димососа) 4 проходять через теплообмінник 5 і надходять в нижню частину зони 6 горіння і газифікації.

Подача окислювача може здійснюватися в різні області системи - ділянки 7 і 8 зони горіння і газифікації, а також в нижню частину зони піролізу (ділянка 9). Ці точки подачі є можливими варіантами, а чи не обов'язковими.

Гази, які утворюються у верхній частині зони газифікації 10, частково прямують назад у зону піролізу, де беруть участь у подальшому перебігу процесу. Решта газів проходить через теплообмінник 5 і виводиться через вихідний отвір 11 до споживача.

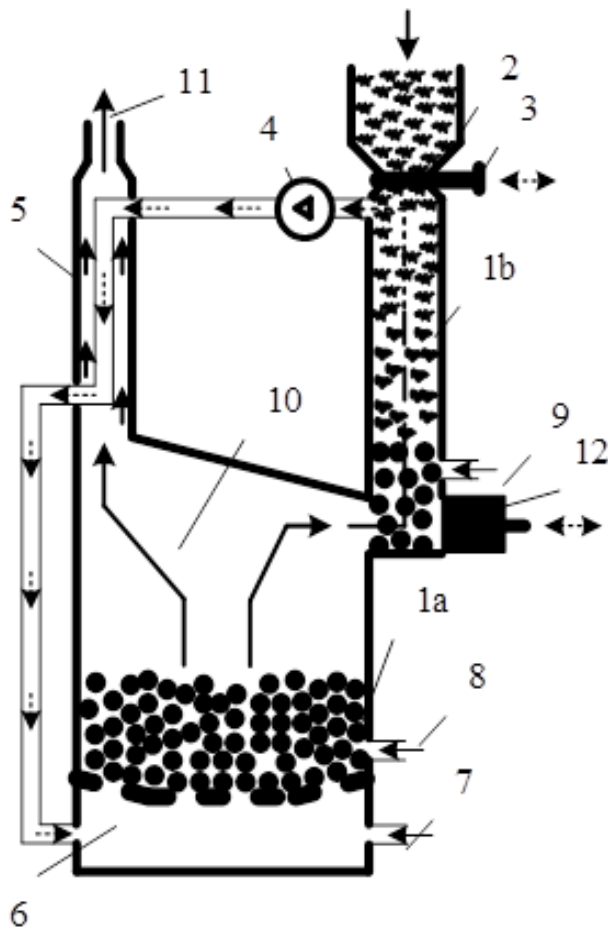


Рис. 1 - Принципова схема ГГ [7]

Розглянемо принцип роботи установки з прикладу використання деревних відходів як вихідної сировини.

Установка працює у заданому режимі. Висока температура деревного вугілля в зоні 1a підтримується різними способами:

- за рахунок його подальшого горіння при подачі окислювача через канал 8;
- за рахунок часткового спалювання (окислення) частини піролізних газів, які у зону 6, при подачі окислювача через канал 7, після чого продукти горіння проходять через шар вугілля;
- або з використанням комбінації цих двох способів.

У міру перетворення деревних відходів у вугілля (карбонізації) готове деревне вугілля нижнього сегмента 1b за допомогою механізму 12 переміщається в зону 1a. Одночасно з бункера 2 через клапан 3 здійснюється подача свіжих деревних відходів в піролізну частину 1b.

Управління процесом роботи газогенератора (ГГ) може виконуватися за рахунок:

- регулювання продуктивності димососу 4;
- зміни точки подачі окислювача (через 7, 8 або 9, їх поєднання) та обсягів окислювача, що подається;

- регулювання швидкості подачі вугілля з нижньої частини сегмента 1b в зону 1a, а також швидкості подачі вихідної сировини з бункера 2.
- Модель, метод дослідження описані у [8].

Особливості рішення.

Один з підходів до вирішення систем нелінійних алгебраїчних рівнянь полягає в їх лінеаризації та послідовному уточненні шуканих змінних. При лінеаризації необхідно обчислити похідні членів нелінійних виразів. У розробленій моделі передбачається, що концентрація парів вуглецевого залишку в процесі ітераційного пошуку наближеного рішення при фіксованій температурі залишається незмінною. Отже, її похідна дорівнює нулю. Ця особливість зберігається і для будь-яких інших речовин, що знаходяться в конденсованій фазі, якщо модель змінюється. Саме це відрізняє розрахунки, що виконуються на основі запропонованої моделі.

Методика розрахунку полягає в підборі такої температури і відповідного складу продуктів реакції, при яких сумарна ентальпія продуктів буде дорівнювати сумарній ентальпії вихідних компонентів — вихідного палива і окислювача. У літературних джерелах зазвичай наводяться значення ентальпії для газоподібних і рідких речовин. Однак для твердих горючих матеріалів, наприклад деревини різної вологості, замість ентальпії частіше вказують теплотворну здатність. У таких випадках ентальпію необхідно попередньо обчислити.

4 Визначення вихідних даних для розрахунку складу продуктів газогенерації

Хімічний склад горючої частини деревини різних порід в цілому мало відрізняється, тому при теплотехнічних розрахунках зазвичай використовують усереднені значення елементного складу: вуглець — 51%, водень — 6,1%, кисень — 42,3%, азот — 0,6%. Оскільки вміст азоту незначний, ним часто нехтують при наближених розрахунках.

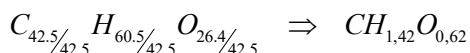
Виходячи з цих даних, можна представити органічну частину сухих соснових відходів (без урахування вологості) у вигляді узагальненої брутто-формули, що відображає співвідношення основних елементів.



При цьому ентальпія становить

$$I = - 6516 \text{ кДж/кг.}$$

Для спрощення подальших розрахунків вираз (1) можна представити в більш зручній формі:



При цьому молярна маса даного складу становить

$$\mu_c = 0,0233 \text{ кг/моль},$$

а ентальпія одного моля речовини дорівнює:

$$I_0 = -152,1 \text{ кДж/моль}.$$

Наведені дані стосуються абсолютно зневодненої деревини. Необхідно визначити склад (брутто-формулу) та ентальпію деревних відходів сосни при різних значеннях відносної вологості. В якості вихідного положення приймається визначення відносної вологості, що виражається через масу води та молярну масу абсолютно зневодненої деревини:

$$\varphi = \frac{x}{\mu_c + x}$$

де μ_c — молярна маса абсолютно сухої деревини сосни,

x — маса зв'язаної води.

З даного виразу впливає залежність:

$$x = \frac{\varphi}{1 - \varphi} \cdot \mu_c$$

Таблиця 1 - Брутто-формули та ентальпії деревини сосни різної вологості

φ	0	0.2 (20%)	0.4 (40%)	0.6 (60%)
Брутто-формула	$CH_{1.42} O_{0.62}$	$CH_{2.06} O_{0.94}$	$CH_{3.15} O_{1.48}$	$CH_{5.3} O_{2.56}$
Ентальпія (кДж/моль)	-152.1	-243.6	-398.8	-706.6

У розрахунках, виконаних на основі моделі [8], крім врахування різних значень коефіцієнта надлишку окислювача α ($\alpha < 1$) і різних величин вологості φ , можливо також враховувати частину енергії, що повертається в зону реакції за рахунок теплообмінника (поз. 5 на рис. 1). Такий облік здійснюється за наступним алгоритмом.

Спочатку з усього складу продуктів газогенерації виділяються тільки газоподібні компоненти, виключаючи вуглецевий залишок. Для цієї газової суміші визначається ентальпія I_g при температурі процесу газогенерації. Потім для того ж складу обчислюється ентальпія I_{oc} при температурі навколишнього середовища, при цьому передбачається, що вода зберігається в пароподібному стані (аналогічно тому, як це враховується при визначенні нижньої теплотворної здатності палива).

Різниця $\Delta I = (I_g - I_{oc})$ характеризує максимальну можливу кількість енергії, яка може бути

Отримана при охолодженні газоподібної складової продуктів газогенерації. Певна частина цієї енергії (у відсотковому вираженні) додається до ентальпії вихідної речовини, що позначається як (8). Після цього в ітераційному процесі шукається рішення вихідної моделі.

$$CH_{1.42} O_{0.62} + 0.32 \cdot H_2O = \\ = CH_{1.42+0.32 \cdot 2} O_{0.62+0.32} = CH_{2.06} O_{0.94}$$

Якщо прийняти табличне значення ентальпії води $I_v = -285,8$ кДж/моль, то ентальпія деревини при вологості 20% буде визначатися як сума ентальпії абсолютно сухої деревини та внеску, пов'язаного з водою, що міститься в ній:

$$I_{0.2} = I_0 + 0.32 \cdot I_v = -243.6 \text{ кДж/моль}$$

Розрахунки, виконані за цим алгоритмом, дозволяють визначити брутто-формули вологості деревини та відповідні значення її ентальпії при різних значеннях відносної вологості φ . Результати представлені в таблиці 1.

Якість газоподібної частини продуктів газогенерації, що отримуються при різних поєднаннях параметрів α , φ і ΔI , оцінюється за сумарною теплою згоряння простих газів (за табличними даними), що входять до їх складу. При цьому важливо враховувати, що при зберіганні газогенераторного газу в газгольдерах або при його транспортуванні по трубопроводах гарячі продукти газогенерації, як правило, охолоджуються до температури навколишнього середовища. Вміщені в них пари води практично повністю конденсуються, тому при визначенні теплоти згоряння вони не враховуються. В результаті у складі залишаються тільки горючі гази — оксид

вуглецю (CO), водень (H₂), метан (CH₄) — а також вуглекислий газ (CO₂), який виступає як баласт. Співвідношення обсягів цих компонентів визначаються з результатів розрахунку складу продуктів газогенерації.

5 Аналіз результатів розрахунків

Адекватність отриманих розрахункових результатів оцінюється шляхом їх порівняння з даними експериментальних досліджень. Однак в області газифікації органічних речовин в літературі відзначається істотний розкид експериментальних даних різних авторів [9–10]. У зв'язку з цим представляє інтерес порівняти результати розрахунків з діапазонами варіювання експериментальних значень окремих характеристик процесу.

У роботі [9] наводиться характерне значення найнижчої теплотворної здатності піролізних газів у діапазоні 13–15 МДж/м³. Слід враховувати, що більшість експериментальних досліджень виконується на зразках деревини повітряно сухого стану ($\varphi = 0,15\text{--}0,2$) або кімнатно сухого ($\varphi = 0,08\text{--}0,1$). На рис. 2 представлені результати розрахунку найнижчої теплотворної здатності піролізних газів за використаною моделлю при різній вологості деревини. З аналізу отриманих залежностей випливає, що при вологості $\varphi = 0\text{--}0,2$ в діапазоні температур 800–900 К розрахункові значення добре узгоджуються з експериментальними даними. Зазначений інтервал температур у багатьох випадках є характерним для досліджень процесу повільного піролізу.

Зі збільшенням температури і вологості вихідної сировини зростає частка водню в складі піролізних газів. Водень характеризується високою гравіметричною теплотворною здатністю, проте його теплотворна здатність, віднесена до одиниці об'єму, відносно невелика. В результаті зростання об'ємної частки водню в суміші горючих газів призводить до зниження її об'ємної теплотворної здатності. Даний ефект також відображений в результатах розрахунків (рис. 2). При цьому слід зазначити, що загальний обсяг піролізних газів зростає за рахунок протікання реакцій конверсії парів води і вуглецевого залишку (деревного вугілля).

У роботі [10] зазначається, що ряд дослідників фіксують збільшення виходу газу і одночасне зниження його теплотворної здатності з ростом температури не тільки при піролізі (що підтверджується даними рис. 2), але і при газифікації. При більш високих температурах газифікації спостерігається зменшення кількості твердих частинок у продуктах, що узгоджується з інтенсифікацією діючих термохімічних перетворень.

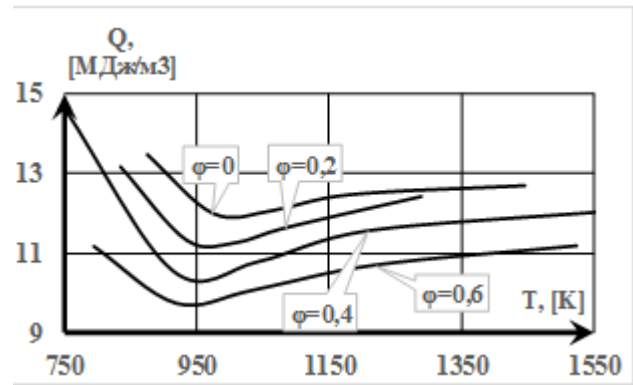


Рис. 2 - Найнижча теплотворна здатність піролізного газу в залежності від вологості деревини

Виконаний аналіз показав, що розглянутий ефект дійсно має місце, проте проявляється він лише за певних умов проведення процесу. Ймовірно, саме ці умови і мали місце в роботах тих дослідників, які експериментально зафіксували зазначене явище. Згідно з результатами розрахунків, зниження найнижчої теплотворної здатності генераторного газу спостерігається тільки в обмеженому діапазоні зміни температури в зоні реакції. При відсутності підведення зовнішньої енергії або при підведенні енергії постійної величини температура газифікації змінюється головним чином за рахунок зміни коефіцієнта надлишку окислювача α . При збільшенні α зростає і температура реакції. У зв'язку з цим коректніше говорити про залежність теплотворної здатності генераторного газу від коефіцієнта надлишку окислювача при певних умовах протікання реакції газифікації. На рис. 3 і 4 представлені результати розрахунків для випадку, коли зовнішнє підведення енергії відсутнє.

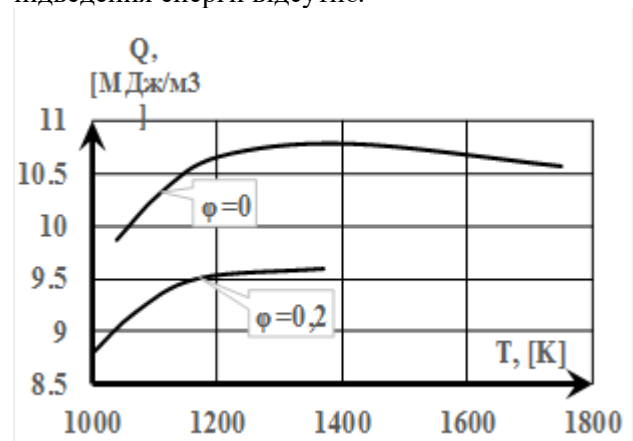


Рис. 3 - Залежність нижчої теплотворної здатності генераторного газу від температури в зоні реакції за відсутності зовнішнього підведення енергії

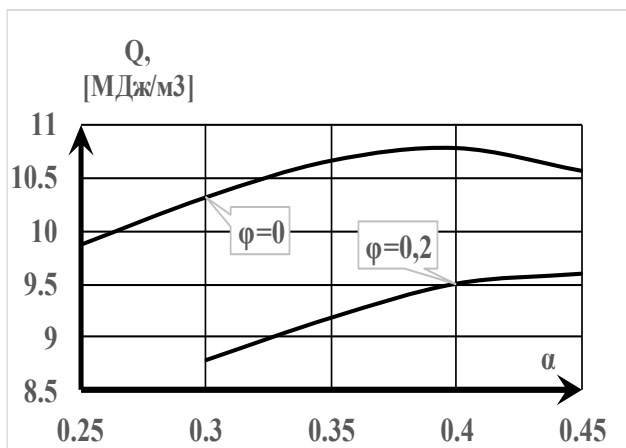


Рис. 4 - Залежність найнижчої теплотворної здатності генераторного газу від коефіцієнта надлишку окислювача в зоні реакції за відсутності зовнішнього підведення енергії

У цьому режимі нагрівання зони реакції забезпечується виключно за рахунок тепловиділення при окисленні частини вихідної сировини. На рис. 3 показана залежність нижчої теплотворної здатності генераторного газу від температури в зоні реакції, а на рис. 4 – від коефіцієнта надлишку окислювача.

З аналізу цих графіків випливає, що в розглянутих умовах із підвищенням температури в зоні реакції зниження теплотворної здатності газу можливе, зокрема, при переробці абсолютно сухої вихідної сировини.

На рис. 5 і 6 показані графіки зміни найнижчої теплотворної здатності генераторного газу для випадку, коли частина енергії додатково підводиться у внутрішню зону реакції, наприклад за допомогою теплообмінника 5 (рис. 1).

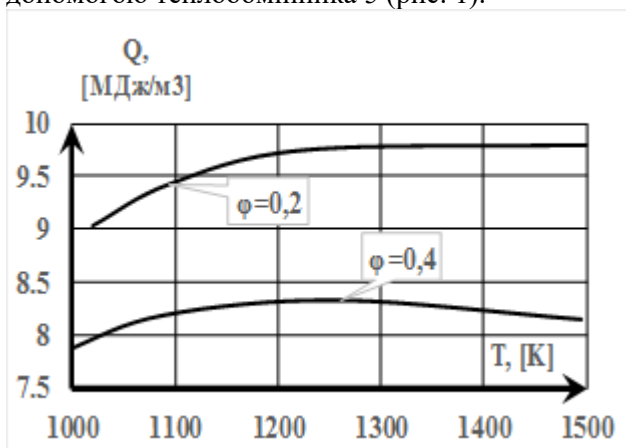


Рис. 5 – Зміна найнижчої теплотворної здатності палива залежно від температури в зоні реакції за наявності зовнішнього підведення енергії.

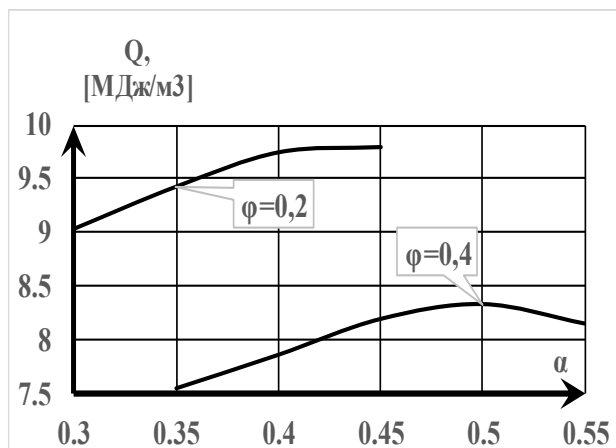


Рис. 6 – Зміна нижчої теплотворної здатності палива залежно від коефіцієнта надлишку окислювача в зоні реакції за наявності зовнішнього підведення енергії

У розглянутій схемі передбачається повернення в зону реакції 25% енергії газів 11 (рис. 1), що виходять з установки.

З аналізу графіків на рис. 5 і 6 видно, що за таких умов, у міру зростання температури в зоні реакції, зниження теплотворної здатності генераторного газу може мати місце при переробці вихідної сировини з високою вологістю ($\phi = 0,4$).

Точне кількісне порівняння розрахованих за моделлю параметрів процесу газифікації з експериментальними даними ускладнене через значний розкид останніх. Так, у роботі [11], на основі огляду результатів ряду авторів, наводяться такі діапазони об'ємних концентрацій компонентів генераторного газу: для CO — 9–35 об.%; для H_2 — 2–35 об.%; для CH_4 — 1–5 об.%; для CO_2 — 9,5–15 об.%. У [10] (табл. 5) наведено склад генераторного газу при кисневому дутті і вказано його найнижчу теплотворну здатність, проте характеристики самого процесу не описані. Тому параметри, при яких отримано наведені там значення, можуть бути встановлені лише орієнтовно. Будемо виходити з припущення, що в роботі [10] розглядається процес газифікації без додаткового підведення енергії. Крім того, у багатьох дослідженнях вихідну сировину перед газифікацією попередньо сушать, тому далі приймаємо, що процес здійснюється для абсолютно сухої деревини сосни.

Оскільки кількість окислювача в [10] явно не вказана, розглянемо випадок коефіцієнта надлишку окислювача $\alpha = 0,35$. Для цих умов в табл. 2 наведено порівняння даних [10] з результатами розрахунку, виконаного за пропонуваною моделлю.

Таблиця 2 – Склад продуктів газифікації при кисневому дутті

Джерело даних	Компоненти (% об'єма)					Q _{ниж} МДж/м ³
	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	N ₂	
[12]	32	48	15	2	3	10.4
Розрахунок	35.5	48.4	16.1	0	–	10.7

Розглянутому варіанту процесу відповідає розрахункова температура 1205 К (932 °С). Дані табл. 1 показують, що за зазначених умов значення, отримані експериментально, добре узгоджуються з результатами розрахунків. Відсутність N₂ в розрахункових даних пов'язана з прийнятою моделлю: через малий вміст азоту в вихідній сировині його присутність не враховувалася. Нульовий вміст метану пояснюється використанням рівноважної моделі. В рамках такої моделі передбачається, що всі можливі процеси термічної деструкції повністю завершені. У реальному експерименті час перебування газової суміші в реакційній зоні обмежений, тому розкладання вихідної органічної сировини може бути незавершеним. Поява метану в продуктах (що спостерігається в багатьох, хоча і не у всіх дослідках) якраз може служити індикатором неповного протікання процесів термічного розкладання.

У той же час розрахунки за рівноважною моделлю показують, що при певних комбінаціях параметрів процесу метан все ж може бути присутнім у продуктах піролізу і газогенерації.

Приклади таких розрахункових даних наведені в таблиці 3, де на відміну від таблиці 2, представлені значення концентрацій всіх компонентів газогенерації, що враховуються в розрахунках, включаючи водяну пару і вуглецевий залишок.

За умовами методу сумарна кількість газоподібних компонентів у кожному варіанті дорівнює одному молю. Ці газоподібні продукти спільно з вуглецевим залишком утворюються з певної кількості вихідної сировини, позначеної як M_T. Параметр ΔI характеризує частку енергії газоподібних продуктів реакції, яка через теплообмінник 5 (рис. 1) повертається назад у реакційну зону.

Таблиця 3 - Склад продуктів газогенерації

ΔI	φ	α	T, [K]	Кількість молей							Q _{ниж} МДж/м ³
				M _T	CO	CO ₂	CH ₄	C _{угл}	H ₂	H ₂ O	
0	0	0.25	1040	0.74	0.29	0.19	0.004	0.25	0.35	0.17	9.9
		0.3	1110	0.67	0.36	0.16	0.001	0.14	0.33	0.14	10.3
	0.4	0.35	900	0.45	0.05	0.25	0.007	0.15	0.24	0.45	7.3
		0.4	980	0.42	0.10	0.24	0.001	0.08	0.27	0.39	7.7
40%	0	0.2	1010	0.79	0.25	0.20	0.008	0.34	0.36	0.18	9.9
		0.25	1075	0.71	0.33	0.17	0.002	0.21	0.35	0.14	10.3
	0.4	0.35	940	0.44	0.07	0.24	0.004	0.12	0.27	0.41	7.7
		0.4	1010	0.41	0.11	0.24	0.001	0.06	0.28	0.37	8.0

6 Висновки та перспективи

1. В рамках використаної моделі рівноважних хімічних реакцій виконано розрахунок параметрів та складу газової суміші, що утворюється при роботі комбінованого газогенератора при різному складі та вологості вихідної деревної сировини.

Порівняння результатів розрахунку з даними експериментальних досліджень інших авторів показало, що запропонована модель адекватно відтворює перебіг процесів газифікації і піролізу.

Використання підходу, заснованого на рівноважних хімічних реакціях, дозволяє коректно застосовувати отримані результати для опису процесів, що повільно протікають.

Отримані результати доцільно розглядати як граничні, тобто такі, що характеризують максимально можливі значення параметрів системи.

2. Побудована модель газифікації деревної сировини з використанням кисневого дуття продемонструвала можливості запропонованого підходу.

Розширення переліку можливих хімічних реакцій відкриває перспективу дослідження у єдиному методичному підході процесів горіння, піролізу та газифікації.

В рамках цієї моделі можуть бути враховані різні окислювальні агенти, зокрема, повітряне, кисневе, пароповітряне, парокисневе та парове дуття. Також можуть бути враховані різні способи підведення додаткової зовнішньої енергії, наприклад, через огорожувальні конструкції (теплообмінники) або разом з паровим дуванням.

Подальший розвиток і деталізація моделі призведе до збільшення кількості рівнянь у системі нелінійних рівнянь алгебри і, відповідно, до ускладнення процедури їх вирішення, проте забезпечить більш повний і точний опис реальних процесів у комбінованих газогенераторах.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів стосовно цього дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на досліджен-

ня, а також на результати, представлені в цій статті.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Наявність даних

Усі дані доступні в числовій або графічній формі в основному тексті рукопису.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що вони не використовували технології штучного інтелекту під час створення цієї роботи.

Внесок авторів

О. І. Брунеткін: написання тексту – оригінальний чернетка, редагування, керівництво;
Є. Г. Філіппов: чисельні розрахунки;
А. М. Іванесв: чисельні розрахунки;
В. В. Тафій: чисельні розрахунки, адміністрування проєкту.

References

1. Hanchate, N., Ramani, S., Mathpati, C.S. and Dalvi, V.H. (2020). Biomass Gasification using Dual Fluidized Bed Gasification Systems: A Review. *Journal of Cleaner Production*, 280(1), p.123148. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123148>.
2. Samylin, O., Tsyvenkova, N. and Golubenko, A. (2023). Suchasni enerhoefektyvni tekhnolohiyi vykorystannya vidkhodiv biomasy v sil's'komu, lisovomu ta komunal'nomu hospodarstvakh [Modern energy-efficient technologies for using biomass waste in agriculture, forestry and municipal services]. *Polissiauniver.edu.ua*. [online]. Available at: http://ir.polissiauniver.edu.ua/bitstream/123456789/2848/1/VZNAU_2009_1_269-278.pdf. [Accessed 20 Mar. 2026]
3. Tkachenko S.Y., Bodnar L.A. and Yuzyuk A.O. (2011). Perspektyvni napryamky vykorystannya biomasu yak dzherela enerhiyi [Promising directions of biomass use as an energy source]. [Text]. *Visnyk Vinnyts'koho politekhnichnoho instytutu* [Bulletin of Vinnytsia Polytechnic Institute], 2, pp. 68-73. Available at: <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/1396/1396>. [Accessed 20 Mar. 2026].
4. Esa Kurkela (2023). *Review of Finnish biomass gasification technologies*. [online] ResearchGate. Available at: https://www.researchgate.net/publication/30482338_Review_of_Finnish_biomass_gasification_technologies. [Accessed 20 Mar. 2026].
5. Sarkar, S., Kumar, A. and Sultana, A. (2011). Biofuels and biochemicals production from forest biomass in Western Canada. *Energy*, 36(10), pp.6251–6262. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.07.024>.
6. CHOREN Industrietechnik GmbH (2026). [online] Choren.com. Available at: <https://www.choren.com/en/technology/choren-coal-gasification/> [Accessed 20 Mar. 2026].
7. Brunetkin V.O. and Davidov V.O. (2023). Kombinovaniy sharoviy gazogenerator. [Combined Layer Gas Generator]. [online] The 22th International scientific and practical conference 'Modern theories and improvement of world methods'. Helsinki, Finland: International Science Group, pp.440–443. Available at: <https://doi.org/10.46299/ISG.2023.1.22> [Accessed 20 Mar. 2026].

8. Brunetkin, O., Maksymov, M.V., Maksymenko, A. and Maksymov, M.M. (2019). Development of the unified model for identification of composition of products from incineration, gasification, and slow pyrolysis. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(6 (100)), pp.25–31. doi:<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.176422>.

9. Gintautas Bureika, Matijošius, J. and Rimkus, A. (2020). Alternative Carbonless Fuels for Internal Combustion Engines of Vehicles. *Lecture notes in networks and systems*, pp.1–49. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-030-42323-0_1.

10. Couto, N., Rouboa, A., Silva, V., Monteiro, E. and Bouziane, K. (2013). Influence of the Biomass Gasification Processes on the Final Composition of Syngas. *Energy Procedia*, 36, pp.596–606. doi:<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.07.068>.

11. Lyons Cerón, A., Konist, A., Lees, H. and Järvik, O. (2021). Effect of Woody Biomass Gasification Process Conditions on the Composition of the Producer Gas. *Sustainability*, [online] 13(21), p.11763. doi:<https://doi.org/10.3390/su132111763>.

Отримано (Received) 26.11.2025

Отримано після доопрацювання (Received after revision) 19.02.2026

Прийнято (Accepted) 20.03.2026

Опубліковано (Published) 23.04.2026

Study of Thermochemical Conversion of Organic Substances in a Combined Gas Generator

Olexander Brunetkin¹, *Doctor of Technical Sciences, Professor*

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6701-8737>; e-mail: brunetkin@op.edu.ua;
https://www.researchgate.net/profile/Olexander_Brunetkin

Yevgen Filippov¹, *Postgraduate Student*

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9034-176X>; e-mail: 10488154@stud.op.edu.ua

Andriy Ivaneev¹, *Postgraduate Student*

ORCID: <http://orcid.org/0009-0001-7618-3769>; e-mail: 10161115@stud.op.edu.ua

Vasyl Tafii¹, *Master's Student*

ORCID: <http://orcid.org/0009-0004-6556-8964>; e-mail: n-nait@ukr.net

¹ *Odessa Polytechnic National University*

Abstract. *The article considers a model of equilibrium chemical processes in a combined gas generator. Depending on the composition and humidity of the initial wood raw material, the parameters and composition of the gas mixture formed during the operation of the combined gas generator of the proposed scheme are calculated.*

Comparison of the calculation results with the data of experimental studies showed that the proposed model adequately reproduces the course of the gasification and pyrolysis processes.

The proposed model of gasification of wood raw materials using oxygen blast allows you to expand the list of possible chemical reactions, opens up the prospect of research in a single methodological approach to the processes of combustion, pyrolysis and gasification. Within the framework of this model, various oxidants can be taken into account: air, oxygen, steam-air, steam-oxygen and evaporation, as well as various methods of supplying additional external energy: through enclosing structures (heat exchangers) or together with a steam blast.

Further development and detailing of the model will lead to an increase in the number of nonlinear algebraic equations describing chemical processes in a combined gas generator, respectively, to a complication of the procedure for their solution, but will provide a more complete and accurate description of real processes in combined gas generators.

Keywords: *thermochemical conversion, organic matter, equilibrium model, oxygen blowing, combined gas generator.*

Article citation: Brunetkin O. I., Filippov E. G., Ivaneev A. M., Tafiy V. V. (2026) Research on thermochemical conversion of organic substances in a combined gas generator. *Electrotechnic and Computer Systems*, 45(121), pp.71-81. doi:<https://doi.org/10.15276/eltecs.45.121.2026.7>

Про авторів (About the authors)



Брунеткін Олександр Іванович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри програмних і комп'ютерно-інтегрованих технологій, Національний університет «Одеська політехніка»; просп. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна.
E-mail: brunetkin@op.edu.ua; тел.: +380 50 299 4232

Olexander Brunetkin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Software and Computer-Integration Technology, Odessa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Ave., Odessa, 65044, Ukraine.
E-mail: brunetkin@op.edu.ua; ph.: +380 50 299 4232

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6701-8737>
https://www.researchgate.net/profile/Olexander_Brunetkin



Філіппов Євген Геннадійович, аспірант кафедри програмних і комп'ютерно-інтегрованих технологій, Національний університет «Одеська політехніка»; просп. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна. E-mail: 10488154@stud.op.edu.ua; тел.: +380 67 716 1160

Yevgen Filippov, Postgraduate Student of the Department of Software and Computer-Integrated Technologies, Odessa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Ave., Odessa, 65044, Ukraine.

E-mail: 10488154@stud.op.edu.ua; ph.: +380 67 716 1160

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9034-176X>



Іванєєв Андрій Миколайович, аспірант кафедри програмних і комп'ютерно-інтегрованих технологій, Національний університет «Одеська політехніка»; просп. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна.

E-mail: 10161115@stud.op.edu.ua; тел.: +380 97 705 5396

Andriy Ivaneev, Postgraduate Student of the Department of Software and Computer-Integrated Technologies, Odessa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Ave., Odessa, 65044, Ukraine. E-mail: 10161115@stud.op.edu.ua; ph.: +380 97 705 5396

ORCID: <http://orcid.org/0009-0001-7618-3769>



Табій Василь Васильович, магістрант кафедри програмних і комп'ютерно-інтегрованих технологій, Національний університет «Одеська політехніка»; просп. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна.

E-mail: n-nait@ukr.net; тел.: +380 97 299 8623

Vasyl Tafii, Master's Student of the Department of Software and Computer-Integrated Technologies, Odessa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Ave., Odessa, 65044, Ukraine.
E-mail: n-nait@ukr.net; ph.: +380 97 299 8623

ORCID: <http://orcid.org/0009-0004-6556-8964>

Аудит роботи електричного обладнання розподільних та генеруючих мереж

В. О. Разінков, доктор філософії

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0934-0426>; e-mail: razinkov.v.o@opu.ua

Національний університет «Одеська політехніка»

Анотація. У статті розглядається тепловізійна діагностика як інструмент технічного огляду електрообладнання в системах електропостачання. Зазначається, що сьогодні тепловізійний контроль є одним з найефективніших методів безконтактного виявлення дефектів контактних з'єднань, електротехнічних пристроїв, з'єднувальних елементів та силових кабелів. Особлива увага приділяється аналізу переваг використання тепловізійної діагностики в профілактичному обслуговуванні, зокрема її здатності виявляти небезпечні ділянки на ранніх стадіях розвитку пошкоджень. Тепловізійний контроль дозволяє швидко виявити потенційні порушення режимів роботи, зниження якості електричних з'єднань, локальний перегрів та інші дефекти, які можуть призвести до надмірних втрат енергії, передчасного зносу обладнання або навіть до аварійних та пожеже небезпечних ситуацій. На відміну від традиційних методів діагностики, тепловізійний аналіз не вимагає зупинки обладнання, що робить його надзвичайно зручним для використання в умовах безперервної роботи об'єктів енергетичної інфраструктури.

Показано, що впровадження систематичного тепловізійного моніторингу підвищує рівень надійності енергопостачання, допомагає запобігти простоям, знижує витрати на аварійне обслуговування та ремонт, а також дозволяє своєчасно виявляти помилки монтажу або виробничі дефекти. Крім того, такий підхід сприяє підвищенню загальної енергоефективності електрообладнання, що особливо актуально в умовах зростання використання відновлюваних джерел енергії, децентралізованої генерації та інтелектуальних мереж. Узагальнення результатів дослідження підкреслює доцільність включення тепловізійного моніторингу до регулярного обслуговування енергетичних об'єктів, а також актуальність подальшого розвитку методів аналізу та обробки тепловізійних даних з метою автоматизації діагностики та підвищення її точності.

Ключові слова: тепловізійне обстеження, ефективність роботи, температурний режим, надійність електропостачання, аварійні ситуації.

Цитування статті: Разінков В. О. (2026). Аудит роботи електричного обладнання розподільних та генеруючих мереж. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*, 45(121), с.82-88. doi:<https://doi.org/10.15276/eltecs.45.121.2026.8>

Вступ

Надійність електропостачання значною мірою залежить від технічного стану електротехнічного обладнання, яке експлуатується в умовах зростаючих навантажень та ускладнення інфраструктури. Незважаючи на широке впровадження індустріальних методів будівництва розподільчих пристроїв, що сприяють стандартизації та підвищенню технологічності монтажу, питання ефективного контролю їхнього технічного стану залишається відкритим.

Одним із перспективних напрямів діагностики є тепловізійне обстеження, яке дозволяє опе-

ративно виявляти перегриви елементів, пов'язані з дефектами з'єднань, перевантаженням, деградацією ізоляції. Водночас, практика застосування тепловізійного контролю все ще обмежена, особливо на невеликих ділянках електричних мереж, таких як розподільні щити, малі трансформаторні підстанції та внутрішні абонентські мережі. Це створює додаткові технічні ризики та ускладнює вчасне виявлення потенційно аварійних станів.

Актуальність тепловізійних обстежень електричного обладнання зумовлена необхідністю підвищення надійності, безпеки та ефективності експлуатації електричних мереж. Більшість дефектів у електротехнічних пристроях, таких як

ослаблені контакти, перевантаження, погіршення стану ізоляції або порушення теплового режиму, проявляються у вигляді локального перегріву задовго до настання аварійної ситуації. Тепловізійна діагностика дозволяє своєчасно виявляти такі дефекти без знеструмлення обладнання, що робить її надзвичайно цінним інструментом для профілактичного контролю.

На відміну від традиційних методів, тепловізійне обстеження є безконтактним, оперативним та візуально наочним, що значно спрощує виявлення аномалій навіть у складних технологічних умовах. Застосування цього методу дозволяє знизити ризики аварій, зменшити витрати на ремонт і простої, а також подовжити термін служби обладнання.

Тепловізійні обстеження мають дедалі більше ставати невід'ємною складовою сучасної системи технічного обслуговування та моніторингу стану електроустановок, особливо в умовах підвищених вимог до енергоефективності, надійності та безпеки електропостачання.

1 Мета дослідження

Метою даної роботи є аналіз ефективності застосування тепловізійного обстеження електротехнічного обладнання розподільних пристроїв на основі практичного дослідження, спрямованого на виявлення прихованих дефектів та аномалій, які можуть призвести до порушень у роботі системи електропостачання. Особлива увага приділяється оцінці характеру та ступеня потенційних ризиків, пов'язаних з виявленими тепловими відхиленнями, а також визначенню доцільності впровадження тепловізійного контролю як елементу профілактичного технічного обслуговування в малих і середніх електричних мережах.

2 Матеріали та результати дослідження

Для проведення дослідження було обрано елементи системи електропостачання: розподільчих мереж, систем генерації електричної енергії, систем накопичення електроенергії. Тепловізійні обстеження здійснювалися в різні моменти часу за довільних режимів роботи обладнання. В усіх випадках навантаження не досягало максимальних значень, що дозволило оцінити стан обладнання у звичайних експлуатаційних умовах, близьких до типової повсякденної роботи.

При тепловізійному обстеженні рубильника типу РПБ-4П було зафіксовано підвищену температуру на його корпусі, майже 120 °С (Рис.1)

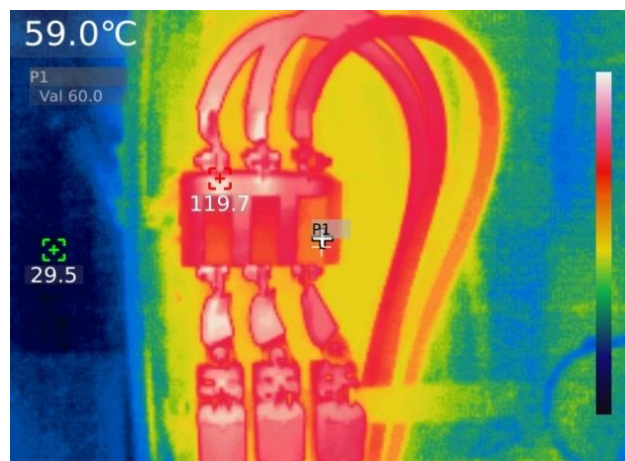


Рис. 1 - Теплограма ввідного рубильника РПБ-4П 400 А

У момент тепловізійного обстеження через рубильник діяв струм 217 А, що становить трохи більше половини від його номінального значення 400 А. Згідно нормативним вимогам, температура контактних з'єднань з міді, яка не має покриття, не повинна перевищувати 80 °С (бути більшою на 45 °С за температуру навколишнього середовища). Варто зазначити, що тепловізійне вимірювання проводилося на поверхні корпусу рубильника, а самі контактні ножі розміщені всередині пристрою. Враховуючи зменшення потоку випромінювання теплової енергії в корпусі апарату можна припустити, що температура всередині корпусу є ще вищою, що беззаперечно свідчить про наявність прихованого дефекту в рубильнику РПБ-4П 400 А. Його розвиток може призвести до втрати електропостачання об'єкту, в результаті чого можливі фінансові збитки за рахунок порушення нормальної діяльності обладнання, до займання, в результаті чого буде пошкоджене й інше обладнання, проте в найменш поганому випадку, фінансові збитки складуть вартість заміни даного обладнання.

Окрім можливих фінансових ризиків підвищена температура спричиняє додаткові втрати електричної енергії, які за рік можна оцінити за допомогою формули

$$\Delta W_a = 8,76 I^2 \frac{\rho l (t_a - t_d)}{s_a (t_d - t_n)}, \text{ кВт} \cdot \text{год} \quad (1)$$

де I – струм, що діє через ділянку, що перегрівається, А;

ρ – питомий опір матеріалу з якого зроблена ділянка, що перегрівається (Ом·мм²)/м;

l – довжина ділянки, що перегрівається, м;

s_a – площа поперечного перерізу ділянки, що перегрівається, m^2 .

t_a – температура перегрітої ділянки, $^{\circ}C$;

t_d – температура ділянки, що має нормальний нагрів, $^{\circ}C$;

$t_{п}$ – температура оточуючого повітря, $^{\circ}C$;

За результатами обчислення по (1) орієнтовні втрати електричної енергії для даного рубильника складуть близько 35 кВт-год за рік.

При тепловізійному обстеженні електротехнічного обладнання було виявлено локальне перегрівання в зоні болтового з'єднання фази автоматичного вимикача з однією із шин. Підвищена температура спостерігалася безпосередньо в області кріплення, що свідчить про можливе послаблення з'єднання або недостатню силу затягування контактної вузла (Рис. 2). Подібні дефекти є типовими причинами зростання контактної опору, надмірного тепловиділення навіть за номінального режиму роботи.

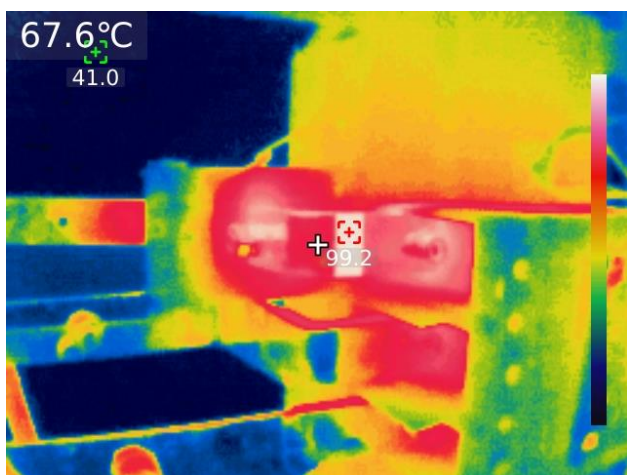


Рис. 2 - Теплограма перегрівання шини в місці кріплення до автоматичного вимикача

Послаблення контактних з'єднань є досить поширеним явищем в експлуатації електроустановок. Такі дефекти можуть виникати як унаслідок термічного розширення металевих елементів під час тривалого циклічного навантаження, так і через недостатню якість затягування контактів на етапі монтажу. Регулярне проведення тепловізійної діагностики дає змогу своєчасно виявляти подібні відхилення без необхідності демонтажу обладнання або переривання його роботи. Це дозволяє не лише мінімізувати експлуатаційні витрати, але й суттєво підвищити загальний рівень надійності та безпеки системи електропостачання.

При тепловізійному обстеженні конденсаторних батарей також було зафіксовано перегрівання розрядних опорів цих батарей. В умовах нормальної експлуатації ці резистори мають бути відключеними в робочому режимі ККУ, однак їх нагрівання до температури 120 $^{\circ}C$ (Рис. 3) свідчить про їх постійне включення, тобто можливий дефект.

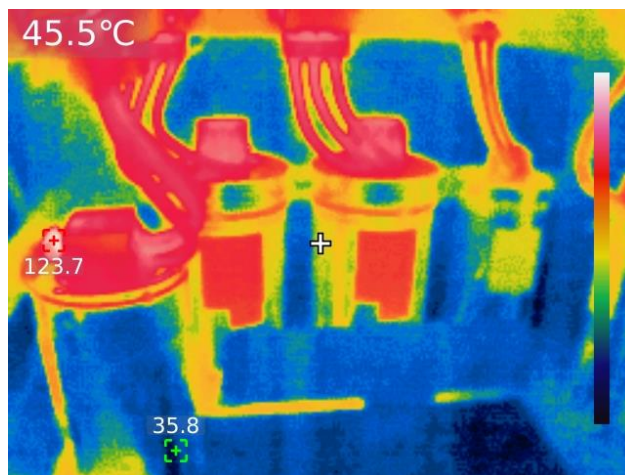


Рис. 3 - Теплограма перегрівання розрядних опорів конденсаторів ККУ

Постійне навантаження на розрядні опори може призвести до прискореного зносу або виходу з ладу самих резисторів й пов'язаних з ними конденсаторів. Наслідком цього може стати тимчасове зниження ефективності компенсації реактивної потужності в мережі, що у свою чергу призведе до фінансових втрат у вигляді платежів за спожиту реактивну енергію.

Окрім розподільчих мереж було проведено тепловізійне обстеження елементів електрообладнання сонячних електростанцій. В результаті виявлено сім конекторів типу MC4 (які з'єднують між собою сонячні панелі) з температурою понад 100 $^{\circ}C$. Це суттєво перевищує характерні значення для аналогічних з'єднань (інших конекторів) у тому ж стрінгу, температура яких не перевищувала 55 $^{\circ}C$.

Максимальна зафіксована температура становила 160 $^{\circ}C$ (Рис. 4), що вказує на значне зростання перехідного опору в окремих з'єднаннях. За умови, що номінальний перехідний опір справного контакту MC4 становить близько 5 мОм, а температура при нормальній роботі не перевищує 60 $^{\circ}C$, таке перегрівання може відповідати збільшенню перехідного опору приблизно на 40 % і більше.

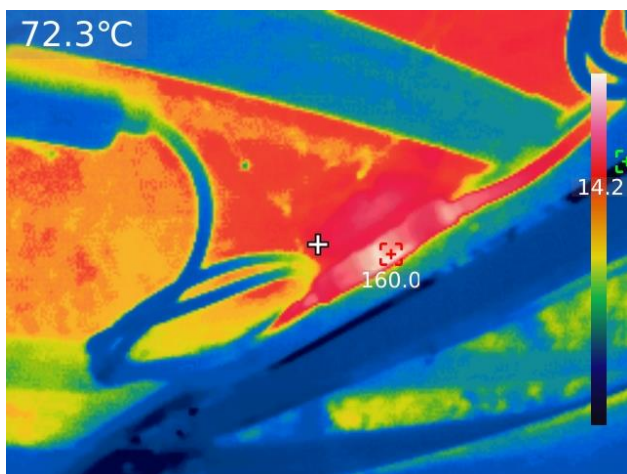


Рис. 4 - Теплограма перегрівання конектора сонячних панелей МС4

Подібне теплове перевантаження свідчить про деградацію контактної поверхні або неповне з'єднання, що створює потенційну загрозу виходу з ладу з'єднувача, втрат виробітку електроенергії та навіть ризику займання.

За розрахунком, через такий дефект на одному конекторі, за робочий день сонячної електростанції в середньому втрачається близько 70 Вт електроенергії. З урахуванням того, що при обстеженні сонячної електростанції було виявлено дефекти на сьоми таких конекторах, сумарні втрати електроенергії за добу при сонячній погоді може скласти близько 500 Вт·год.

Досить показовими виявилися також результати тепловізійного обстеження ділянки приєднання сонячних збірок безпосередньо до інвертора. З'єднання здійснюється за допомогою стандартного конектора типу МС4, однак термограма виявила нерівномірність нагрівання його частин (Рис. 5).

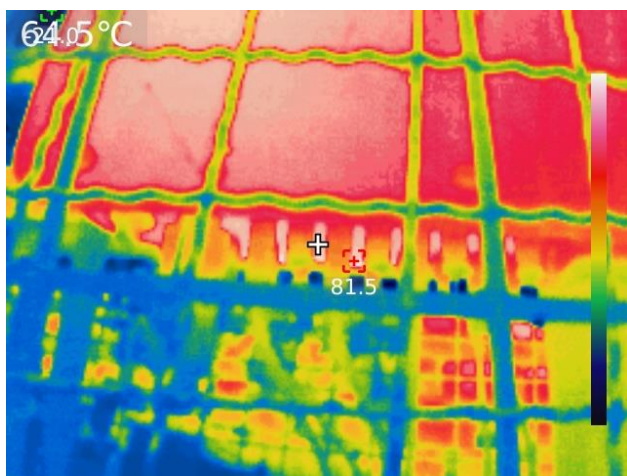


Рис. 5 - Теплограма нагрівання місць приєднання сонячних збірок

Зокрема, частина з'єднання, що встановлена та закріплена безпосередньо в корпусі інвертора і постачається в заводській комплектації, показала температуру до 82 °С, у той час як інша частина цього ж з'єднувача, яка приєднується зі сторони сонячної збірки, мала температуру на рівні типових значень для справних конекторів МС4, близько 55 °С.

Подібна різниця у температурних показниках в межах одного з'єднання свідчить про можливі дефекти заводського складання або неконтрольовані відхилення у процесі виробництва сонячних збірок, оскільки ці з'єднання не змінювались у процесі монтажу сонячних електростанцій і залишаються у первісному вигляді з моменту постачання елементів обладнання.

Виявлення подібних аномалій вказує на доцільність впровадження попередніх випробувань контактної опору заводських з'єднань до моменту введення сонячної електростанції в експлуатацію. З огляду на те, що зазначені частини інвертора після монтажу часто стають важкодоступними для огляду або обслуговування, наявність дефектів контактних з'єднань в самих комплектуючих елементах електрообладнання сонячних електростанцій може залишитися непоміченою. А це негативно впливає на надійність роботи всієї системи електропостачання, створює потенційні ризики виходу з ладу елементів сонячної електростанції та може погіршити якість виробленої електроенергії.

Серед виявлених температурних дефектів також привернуло увагу перегрівання кабельної перемички, яка з'єднує в послідовну збірку висковольтні акумуляторні батареї у складі системи накопичення енергії, що працює разом із сонячною електростанцією (Рис. 6).

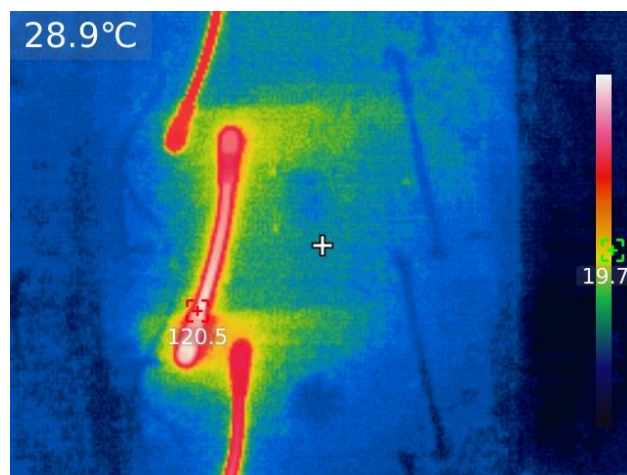


Рис. 6 - Теплограма нагрівання кабельної перемички АКБ

Під час тепловізійного обстеження було зафіксовано локальний перегрів у місці приєднання кабелю до клеми акумулятора з температурою 120 °С.

Водночас тепловізійний аналіз самих акумуляторних батарей не показав ознак перегріву, що виключає ймовірність внутрішньої несправності елементів живлення. Крім того, за температурним режимом акумуляторів у реальному часі постійно стежить вбудована BMS-плата, яка автоматично відключає акумуляторний блок у разі перевищення критичних температур. Враховуючи ці фактори, виявлене перегрівання з великою ймовірністю є наслідком недостатньо надійного контактного з'єднання, зумовленого заводським дефектом або відсутністю належного контролю якості. Це припущення побудовано на тому, що кабельні перемички постачалися разом з АКБ у складі стандартного комплекту і не змінювались під час монтажу сонячної електростанції.

Висновки

Проведене тепловізійне обстеження різних типів електротехнічного обладнання в системах розподіленого електропостачання, відновлюваних джерел енергії та системах накопичення енергії підтвердило, що тепловізійний контроль є ефективним, надійним і доступним методом діагностики, який дозволяє виявляти аварійно небезпечні ділянки на ранніх стадіях їх розвитку. Виявлені випадки перегріву свідчать про наявність прихованих дефектів, що не мають зовнішніх проявів, але можуть призвести до серйозних позаштатних ситуацій, таких як аварії, пожежі або відмови систем електропостачання.

Тепловізійна діагностика дозволяє запобігати порушенням у роботі обладнання до моменту їхнього критичного розвитку, тим самим значно знижуючи ризики простоїв, втрат генерації чи пошкодження інфраструктури. Крім підвищення технічної безпеки, своєчасне виявлення дефектів сприяє оптимізації режимів роботи, зменшенню втрат енергії, а також забезпечує економію витрат, які в іншому випадку були б спрямовані на ремонт, заміну чи модернізацію обладнання після настання аварії.

Таким чином, впровадження регулярного тепловізійного контролю в систему технічного

обслуговування електротехнічних комплексів є доцільним, економічно обґрунтованим та критично важливим заходом, що напряму впливає на надійність, енергоефективність і довговічність електроенергетичної інфраструктури, особливо в умовах активного використання розподіленої генерації та відновлюваних джерел енергії.

Конфлікт інтересів

Автор цієї наукової статті заявляє про відсутність будь-якого конфлікту інтересів: фінансових, майнових, професійних, особистих або інших обставин, які могли б прямо чи опосередковано вплинути на процес дослідження, об'єктивність аналізу, інтерпретацію отриманих результатів або висновки, представлені в даній роботі. Усі матеріали подано неупереджено та відповідно до принципів наукової доброчесності.

Фінансування

Дане дослідження проводилося без зовнішнього фінансування, всі витрати пов'язані з процесом виконання дослідження, були покриті за рахунок власних коштів.

Наявність даних

Усі основні, найбільш значущі результати дослідження на думку автора, представлені безпосередньо в тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Штучний інтелект був залучений виключно для попереднього пошуку інформації, всі наведені аналізи, формулювання та висновки є виключно власною думкою та позицією автора і не мають ніякого відношення до діяльності штучного інтелекту.

Внесок автора

Разінков В. О.: Проведення інструментального обстеження, аналітичні висновки, висвітлення результатів для широкого кола фахівців, фахова оцінка можливих причин виникнення дефектів та надання рекомендацій щодо недопущення або попередження виявлених в дослідженні проблем в електричних мережах.

Список використаної літератури

1. Budstandart.com. (2019). *ГКД 34.20.507-2003 Технічна експлуатація електричних станцій і мереж. Правила (у редакції наказу від 21.06.2019 № 271)*. [online] Available at: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=86234 [Дата перегляду 17 березня 2026].
2. Budstandart.com. (2026). *СОУ-Н ЕЕ 20.577:2007 Технічне діагностування електрообладнання та контактних з'єднань електроустановок і повітряних ліній електропередачі за допомогою інфрачервоної техніки*. [онлайн]. Доступно за адресою: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=57533 [Дата перегляду 17 березня 2026].
3. Xia, C., Ren, M., Wang, B., Dong, M., Xu, G., Xie, J. and Zhang, C. (2020). Infrared thermography-based diagnostics on power equipment: State-of-the-art. *High Voltage*, 6(3), pp.387–407. doi:<https://doi.org/10.1049/hve2.12023>.
4. Lvov, M.Yu., Nikinina, S.D., Lvov, Yu.N., Lesiv, A.V., Serebryannikov, E.E., Ryabikov, A.I. and Nazarov, A.A. (2024). Methods for Control and Detection of Fire-Hazardous Defects of Contacts and Contact Connections During Operation of Electrical Installations. *Power Technology and Engineering*, 58(3), pp.547–556. doi:<https://doi.org/10.1007/s10749-024-01846-3>.

References

1. Budstandart.com. (2019). *HKD 34.20.507-2003 Tekhnichna ekspluatatsiya elektrostantsiy ta merezh. Pravyla (zi zminamy, vnesenymy nakazom vid 21.06.2019№ 271) [GKD 34.20.507-2003 Technical operation of power plants and networks. Rules (as amended by the order of 21.06.2019 № 271№ 271)]*. [online]. Available at: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=86234 [Accessed 17 Mar. 2026].
2. Budstandart.com. (2026). *SOU-N EE 20.577:2007 Tekhnichna diahnostyka elektroobladnannya ta kontaknykh z'yednan' elektroustanovok i povitryanykh liniy elektroperedach z vykorystannyam infrachervonoyi tekhnolohiyi [Technical diagnostics of electrical equipment and contact connections of electrical installations and overhead power lines using infrared technology]*. [онлайн]. Доступно за адресою: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=57533 [Accessed 17 Mar. 2026].
3. Xia, C., Ren, M., Wang, B., Dong, M., Xu, G., Xie, J. and Zhang, C. (2020). Infrared thermography-based diagnostics on power equipment: State-of-the-art. *High Voltage*, 6(3), pp.387–407. doi:<https://doi.org/10.1049/hve2.12023>.
4. Lvov, M.Yu., Nikinina, S.D., Lvov, Yu.N., Lesiv, A.V., Serebryannikov, E.E., Ryabikov, A.I. and Nazarov, A.A. (2024). Methods for Control and Detection of Fire-Hazardous Defects of Contacts and Contact Connections During Operation of Electrical Installations. *Power Technology and Engineering*, 58(3), pp.547–556. doi:<https://doi.org/10.1007/s10749-024-01846-3>.

Отримано (Received) 23.09.2025

Отримано після доопрацювання (Received after revision) 16.02.2026

Прийнято (Accepted) 17.03.2026

Опубліковано (Published) 23.04.2026

Audit of the Operation of Electrical Equipment of Distribution and Generating Networks

V. O. Razinkov, PhD

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0934-0426>; e-mail: razinkov.v.o@opu.ua

Odesa Polytechnic National University

Abstract. The article considers thermal imaging diagnostics as a tool for technical inspection of electrical equipment in power supply systems. It is noted that today thermal imaging inspection is one of the most effective methods for non-contact detection of defects in contact connections, electrical devices, connecting elements and power cables. Particular attention is paid to the analysis of the advantages of using thermal imaging diagnostics in preventive maintenance, in particular its ability to detect hazardous areas at the early stages of damage development. Thermal imaging inspection allows you to quickly detect potential violations of operating modes, a decrease in the quality of electrical connections, local overheating and

other defects that can lead to excessive energy losses, premature wear of equipment or even to emergency and fire-hazardous situations. Unlike traditional diagnostic methods, thermal imaging analysis does not require stopping the equipment, which makes it extremely convenient for use in conditions of continuous operation of energy infrastructure facilities.

It has been shown that the implementation of systematic thermal imaging monitoring increases the level of reliability of energy supply, helps prevent downtime, reduces the cost of emergency maintenance and repairs, and also allows for timely detection of installation errors or manufacturing defects. In addition, this approach contributes to increasing the overall energy efficiency of electrical equipment, which is especially relevant in the context of increasing use of renewable energy sources, decentralized generation and smart grids. The generalization of the research results emphasizes the feasibility of including thermal imaging monitoring in the regular maintenance of energy facilities, as well as the relevance of further development of methods for analyzing and processing thermal imaging data in order to automate diagnostics and increase its accuracy.

Keywords: *thermal imaging inspection, work efficiency, temperature regime, power supply reliability, emergency situations.*

Article citation: Razinkov V. O. (2026). Audit of the operation of electrical equipment of distribution and generating networks. *Electrotechnic and computer systems*, 45(121), pp.82-88. doi:<https://doi.org/10.15276/eltecs.45.121.2026.8>

Про автора (About the author)



Разінков Владислав Олексійович, доктор філософії, 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, PhD, 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>

Оптимізація потужності втрат двигуна постійного струму регулюванням струму збудження

В. А. Войтенко¹, кандидат технічних наук, доцент

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2525-6913>; e-mail: voitenko@op.edu.ua

В. А. Водічев¹, доктор технічних наук, професор

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7204-1149>; e-mail: vva@eei.opu.ua,

О. Г. Калінін¹, інженер електрик

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2654-9969>; e-mail: agk@opu.ua

¹ Національний університет «Одеська політехніка»

Анотація. На підставі математичної моделі двигуна постійного струму з незалежним збудженням отримано рівняння залежності сумарної потужності втрат електричної енергії на активному опорі обмотки якоря і обмотки збудження двигуна постійного струму від значення струму збудження і від значення електромагнітного моменту, який розвиває двигун. Також отримано формулу, яка визначає оптимальне значення струму збудження, при якому двигун постійного струму з незалежним збудженням розвиває потрібне значення електромагнітного моменту при мінімальному значенні сумарної потужності втрат електричної енергії на активному опорі обмотки якоря і обмотки збудження. Побудовано діаграму залежності оптимального значення струму збудження від значення електромагнітного моменту. Отримано формулу яка визначає залежність значення сумарної потужності втрат електричної енергії на активному опорі обмотки якоря і на активному опорі обмотки збудження двигуна постійного струму від значення електромагнітного моменту, який розвиває двигун, при номінальному значенні струму збудження і при оптимальному значенні струму збудження. Побудовано діаграми залежності значення сумарної потужності втрат електричної енергії на активному опорі обмотки якоря і на активному опорі обмотки збудження двигуна постійного струму від значення електромагнітного моменту при номінальному значенні струму збудження і при оптимальному значенні струму збудження. Побудовано механічні характеристики двигуна постійного струму з незалежним збудженням при номінальному значенні струму збудження і при оптимальному значенні струму збудження.

Ключові слова: двигун постійного струму, незалежне збудження, потужність, втрати електричної енергії, активний опір, обмотка, якор, оптимальний струм, механічні характеристики.

Цитування статті: Войтенко В. А., Водічев В. А., Калінін О. Г. (2026). Оптимізація потужності втрат двигуна постійного струму регулюванням струму збудження. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*, 45(121), с.89-98. doi:<https://doi.org/10.15276/eltecs.45.121.2026.9>

Вступ

В Україні і в усьому світі приділяється велика увага підвищенню енергетичної ефективності електрообладнання, яке масово застосовується в промисловості, будівництві, транспорті, сільському господарстві.

В 2014 році весь Світ спожив майже $21,78 \times 10^{12}$ кВт·год електричної енергії [1]. Україна впродовж 2020 року спожила приблизно $0,151 \times 10^{12}$ кВт·год електричної енергії, з якої 38,1% припала на промисловість [2]. В Світі електричні двигуни споживають близько 70%

електричної енергії, яку споживає промисловість. В Україні цей показник - понад 60% електроенергії, спожитою промисловістю [2]. Тобто електричні двигуни є головними споживачами електроенергії в світі і в Україні.

Європейська директива 640/2009/ЕС для виробників і користувачів електродвигунів та засобів комутації і захисту компонентів набула чинності в січні 2015 року, а 15 вересня 2021 року Постанова № 157 Кабінету Міністрів України «Про затвердження Технічного регламенту щодо вимог до екодизайну для електродвигунів» [3].

© Войтенко В. А., Водічев В. А., Калінін О. Г., 2026

Ця стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk>)

Ці рішення спрямовані на зменшення споживання електроенергії та зменшення шкідливого впливу на навколишнє середовище в Україні.

Згідно з Технічним регламентом всі електродвигуни, які мають номінальну потужність від 0,75 кВт до 375 кВт повинні мати номінальний коефіцієнт корисної дії не нижче рівня ІЕЗ. Ці вимоги стосуються в основному двигунів змінного струму. Але в народному господарстві і в побуті використовується багато двигунів постійного струму (ДПС), які також споживають багато електроенергії. Двигуни постійного струму використовуються там, де необхідно забезпечити точне регулювання швидкості (металообробні верстати, промислові роботи), а також в електротранспорті, і в підйомних механізмах. В Україні двигуни постійного струму використовують переважно в електротранспорті (тролейбуси, трамваї, метрополітен) та в специфічних промислових установках (прокатні стани, крокуючі екскаватори). Точну глобальну та українську статистику споживання електроенергії саме двигунами постійного струму знайти складно, оскільки основні дані зосереджені на асинхронних двигунах, які домінують у промисловості. Однак, ДПС також споживають значну частину електричної енергії. Тому проблема підвищення енергоефективності ДПС є важливою проблемою сучасної світової економіки.

1 Мета дослідження

При оптимізації електроприводів постійного струму використовують, як правило, два напрямки. Перший напрям – це подальше вдосконалення конструкції двигунів постійного струму. Деякі автори пропонують використовувати елементи магнітної системи електричних машин для проведення струму [6]. Інші автори пропонують використовувати частину осереддя головного полюса як електричні дрони компенсаційної обмотки [7].

Другий напрям – це оптимізація режимів роботи двигунів постійного струму. Так в статті [8] розглядається питання управління тяговим електроприводом постійного струму електропоїзда, яке дозволяє мінімізувати енергетичні витрати при розгоні поїзда. В роботах [9], [10] на базі математичної моделі розглянуто задачу оптимізації електропривода трамвая при сталому навантаженні. В роботі [11] розглянуто умови оптимізації гальмівних режимів ДПС.

Проте, в цих роботах не приділяється достатньо уваги дослідженню зв'язку між значенням потужності втрат енергії в ДПС і значеннями струмів в обмотках збудження і якоря ДПС, а

також значенням електромагнітного моменту, який розвиває ДПС. Це і визначило напрям дослідження.

Отже, метою даної роботи є мінімізація сумарної потужності втрат електричної енергії на активному опорі обмотки якоря і на активному опорі обмотки збудження двигуна постійного струму з незалежним збудженням при будь-якому значенні електромагнітного моменту, який розвиває двигун, завдяки оптимізації значення струму збудження ДПС.

2 Матеріали та результати дослідження

Оптимізація струму збудження двигуна постійного струму з незалежним збудженням полягає в регулюванні струму збудження при зміні значення електромагнітного моменту, який розвиває ДПС так, щоб забезпечити мінімальне значення сумарної потужності втрат електричної енергії в обмотці збудження та в обмотці якоря ДПС. В результаті це має привести до підвищення ККД двигуна. Однак, надмірно велике значення струму збудження може призвести до перегріву обмотки збудження двигуна і до насичення магнітної системи ДПС. Тому в загальному випадку максимальне значення струму збудження ДПС має бути обмежено на допустимому рівні. Занадто мале значення струму збудження може привести до погіршення комутації колектора двигуна. Тому мінімальне значення струму збудження ДПС також має бути обмежено на допустимому рівні. Далі будемо вважати, що магнітна система ДПС є ненасиченою.

Сумарна потужність втрат електричної енергії на активному опорі обмотки якоря ДПС і на активному опорі обмотки збудження ДПС визначається рівнянням (1):

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{\text{я}} + \Delta P_{\text{зб}}, \quad (1)$$

Потужність втрат електричної енергії на активному опорі обмотки якоря ДПС визначається рівнянням (2):

$$\Delta P_{\text{я}} = I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}}, \quad (2)$$

де $I_{\text{я}}$ – струм в обмотці якоря ДПС;

$R_{\text{я}}$ – активний опір обмотки якоря ДПС.

Потужність втрат електричної енергії на активному опорі обмотки збудження ДПС визначається рівнянням (3):

$$\Delta P_{\text{зб}} = I_{\text{зб}}^2 R_{\text{зб}}, \quad (3)$$

де $I_{\text{зб}}$ – струм в обмотці збудження ДПС;

$R_{\text{зб}}$ – активний опір обмотки збудження ДПС.

Електромагнітний момент, який розвиває ДПС, визначається рівнянням (4):

$$M_{EM} = k_E \Phi I_A, \quad (4)$$

де k_E – конструктивний коефіцієнт якірної обмотки ДПС;

Φ – магнітний потік збудження ДПС.

Будемо вважати, що магнітна система ДПС є ненасиченою, тому значення магнітного потоку є пропорційним значенню струму збудження і визначається рівнянням (5):

$$\Phi = k_\Phi I_{ЗБ}, \quad (5)$$

де k_Φ – коефіцієнт зв'язку між значенням струму збудження і значенням магнітного потоку збудження ДПС.

Після підстановки до рівняння (4) замість Φ правої частини рівняння (5) отримаємо рівняння (6), яке визначає електромагнітний момент ДПС:

$$M_{EM} = k_E k_\Phi I_{ЗБ} I_A. \quad (6)$$

На підставі рівняння (6) отримаємо рівняння (7), яке визначає залежність значення струму в обмотці якоря ДПС від значення електромагнітного моменту, який розвиває ДПС і від значення струму збудження ДПС:

$$I_A = \frac{M_{EM}}{k_E k_\Phi I_{ЗБ}}. \quad (7)$$

До рівняння (2) замість I_A підставимо праву частину рівняння (7). В результаті отримаємо рівняння (8) потужності втрат електричної енергії в обмотці якоря ДПС:

$$\Delta P_A = \left(\frac{M_{EM}}{k_E k_\Phi I_{ЗБ}} \right)^2 R_A. \quad (8)$$

До рівняння (1) замість ΔP_A підставимо праву частину рівняння (8), а замість $\Delta P_{ЗБ}$ підставимо праву частину рівняння (3). В результаті отримаємо рівняння (9) сумарної потужності втрат електричної енергії в обмотках якоря і збудження ДПС:

$$\Delta P_\Sigma = \left(\frac{M_{EM}}{k_E k_\Phi I_{ЗБ}} \right)^2 R_A + I_{ЗБ}^2 R_{ЗБ}. \quad (9)$$

Визначимо значення струму збудження ($I_{ЗБ,OPT.}$), при якому ДПС буде розвивати потрібне значення електромагнітного моменту при мінімальному значенні сумарної потужності втрат електричної енергії на активному опорі обмотки якоря і на активному опорі обмотки збудження. Для цього треба взяти першу похідну від рівняння (9) по струму збудження ($I_{ЗБ}$) і прирівняти її нулю:

$$\frac{d\Delta P_\Sigma}{dI_{ЗБ}} = 0, \text{ при } I_{ЗБ} = I_{ЗБ,OPT.} \quad (10)$$

Визначимо похідну від правої частини рівняння (9) по струму збудження:

$$\frac{d\Delta P_\Sigma}{dI_{ЗБ}} = -2 \left(\frac{M_{EM}}{k_E k_\Phi} \right)^2 R_A I_{ЗБ}^{-3} + 2 I_{ЗБ} R_{ЗБ}. \quad (11)$$

Підставимо праву частину рівняння (11) до рівняння (10). В результаті при оптимальному значенні струму збудження має виконуватись рівняння (12):

$$-2 \left(\frac{M_{EM}}{k_E k_\Phi} \right)^2 R_A I_{ЗБ,OPT.}^{-3} + 2 I_{ЗБ,OPT.} R_{ЗБ} = 0. \quad (12)$$

Після перетворень рівняння (12) отримаємо рівняння (13), яке визначає оптимальне значення струму збудження ДПС, як функцію значень параметрів ДПС і значення електромагнітного моменту, який розвиває ДПС:

$$I_{ЗБ,OPT.} = \sqrt[4]{\left(\frac{M_{EM}}{k_E k_\Phi} \right)^2 \frac{R_A}{R_{ЗБ}}}. \quad (13)$$

Підставимо праву частину рівняння (13) до рівняння (3). В результаті отримаємо рівняння (14), яке визначає потужність втрат електричної енергії на активному опорі обмотки збудження ДПС при оптимальному значенні струму збудження:

$$\Delta P_{ЗБ,OPT.} = \sqrt[2]{\left(\frac{M_{EM}}{k_E k_\Phi} \right)^2 \frac{R_A}{R_{ЗБ}}} R_{ЗБ} = \frac{M_{EM}}{k_E k_\Phi} \sqrt[2]{R_A R_{ЗБ}}. \quad (14)$$

Підставимо праву частину рівняння (13) до рівняння (8). В результаті отримаємо рівняння (15), яке визначає потужність втрат електричної енергії на активному опорі обмотки якоря ДПС при оптимальному значенні струму збудження:

$$\Delta P_{A,OPT.} = \left(\frac{M_{EM}}{k_E k_\Phi} \right)^2 \frac{1}{\sqrt[2]{\left(\frac{M_{EM}}{k_E k_\Phi} \right)^2 \frac{R_A}{R_{ЗБ}}}} R_A. \quad (15)$$

Після перетворення рівняння (15) отримаємо рівняння (16):

$$\Delta P_{A,OPT.} = \frac{M_{EM}}{k_E k_\Phi} \sqrt[2]{R_A R_{ЗБ}}. \quad (16)$$

При порівнянні рівняння (14) і рівняння (16) видно, що при оптимальному значенні струму збудження ДПС потужність втрат енергії в обмотці збудження і в обмотці якоря ДПС буде однаковою.

На підставі рівнянь (1), (14) і (16) запишемо рівняння (17), яке визначає сумарну потужність втрат енергії в обмотці збудження і в обмотці якоря ДПС при оптимальному значенні струму збудження:

$$\Delta P_{\Sigma,OPT.} = 2 \frac{M_{EM}}{k_E k_\Phi} \sqrt[2]{R_A R_{ЗБ}}. \quad (17)$$

Поділемо рівняння (9) на рівняння (17). В результаті отримаємо рівняння (18), яке визначає співвідношення сумарної потужності втрат енергії в обмотці збудження і в обмотці якоря ДПС при поточному значенні струму збудження і при оптимальному значенні струму збудження:

$$\frac{\Delta P_{\Sigma}}{\Delta P_{\Sigma, \text{опт.}}} = \frac{1}{2} \frac{1}{k_E k_{\Phi}} \frac{2}{\sqrt{R_{ЗБ}}} \cdot \frac{M_{EM}}{(I_{ЗБ})^2} + \frac{1}{2} \frac{1}{k_E k_{\Phi}} \frac{1}{\sqrt{R_{ЗБ}}} \cdot \frac{M_{EM}}{(I_{ЗБ})^2}. \quad (18)$$

Для прикладу розглянемо двигун постійного струму типу ПН-205, технічні параметри якого наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Основні технічні параметри двигуна постійного струму типу ПН-205 (джерело: [12])

Найменування параметра	Значення
Номинальна потужність двигуна	35 кВт
Номинальна напруга якорної обмотки двигуна, $U_{ЯН}$	220 В
Номинальний струм якорної обмотки двигуна, $I_{ЯН}$	174 А
Номинальна напруга обмотки збудження двигуна, $U_{ЗБ.Н}$	220 В
Номинальна частота обертання валу двигуна, n_H	1580 об/хв.
Сумарний активний опір якорного кола при роботі двигуна в номінальному режимі, $R_{Я}$	0,0855 Ом
Активний опір обмотки збудження при роботі двигуна в номінальному режимі, $R_{ЗБ}$	143,52 Ом

Розрахункові параметри ДПС типу ПН-205:

1) Номинальне значення кутової швидкості валу двигуна:

$$\omega_H = \frac{2\pi n_H}{60}, \quad (19)$$

$$\omega_H = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1580}{60} = 165,37 \text{ рад/с.}$$

де n_H – номінальне значення частоти обертання валу двигуна типу ПН-205.

2) За формулою (20) коефіцієнт зв'язку між значенням кутової швидкості валу ДПС і значенням електрорушійної сили (ЕРС), яку номінальне магнітне поле збудження (Φ_H) генерує в якорній обмотці ДПС:

$$C_{EH} = k_E \Phi_H = \frac{U_{ЯН} - I_{ЯН} R_{Я}}{\omega_H}, \quad (20)$$

$$C_{EH} = \frac{220 - 174 \cdot 0,0855}{165,37} = 1,2404 \text{ Вс.}$$

де $U_{ЯН}$ – номінальна напруга якорної обмотки двигуна;

$I_{ЯН}$ – номінальний струм якорної обмотки двигуна;

$R_{Я}$ – сумарний активний опір якорного кола двигуна при роботі двигуна в номінальному режимі (при номінальному значенні температури двигуна).

3) Номинальне значення струму збудження двигуна за формулою (21):

$$I_{ЗБ.Н.} = \frac{U_{ЗБ.Н.}}{R_{ЗБ}}, \quad (21)$$

$$I_{ЗБ.Н.} = \frac{220}{143,52} = 1,533 \text{ А.}$$

де $U_{ЗБ.Н.}$ – номінальна напруга обмотки збудження двигуна;

$R_{ЗБ}$ – сумарний активний опір обмотки збудження при роботі двигуна в номінальному режимі (при номінальному значенні температури двигуна).

4) На підставі рівняння (4) і рівняння (6) додаток конструктивних коефіцієнтів обмотки якоря і обмотки збудження двигуна за формулою (22):

$$k_E k_{\Phi} = \frac{C_{EH}}{I_{ЗБ.Н.}}, \quad (22)$$

$$k_E k_{\Phi} = \frac{1,2404}{1,533} = 0,809 \text{ Вс/А.}$$

5) На підставі рівняння (6) номінальне значення електромагнітного моменту двигуна за формулою (22):

$$M_{EM.Н.} = C_{EH} I_{ЯН}, \quad (23)$$

$$M_{EM.Н.} = 1,2404 \cdot 174 = 215,8 \text{ Нм.}$$

6) На підставі рівнянь (1), (2) і (3) сумарна потужність втрат електричної енергії на активному опорі обмотки збудження і обмотки якоря ДПС при номінальному значенні струму збудження і при номінальному значенні електромагнітного моменту ДПС типу ПН-205:

$$\Delta P_{\Sigma.Н.} = 174^2 \cdot 0,0855 + 1,533^2 \cdot 143,52,$$

$$\Delta P_{\Sigma.Н.} = 2588,6 + 337,3 = 2925,9 \text{ Вт.} \quad (24)$$

7) На підставі рівняння (17) сумарна потужність втрат енергії в обмотках збудження і якоря ДПС типу ПН-205 при оптимальному значенні струму збудження $I_{ЗБ.Н.}$ і при номінальному значенні електромагнітного моменту $M_{EM.Н.}$ ДПС:

$$\Delta P_{\Sigma, \text{опт.Н.}} = 2 \frac{215,8}{0,809} \sqrt{0,0855 \times 143,52},$$

$$\Delta P_{\Sigma, \text{опт.Н.}} = 1868,8 \text{ Вт.} \quad (25)$$

На рис. 1 за рівнянням (21) побудовано діаграму 1 залежності номінального значення стру-

му збудження ДПС типу ПН-205 від значення електромагнітного моменту $I_{ЗБ.Н.} = f(M_{EM})$, а за (13) - діаграму 2 залежності оптимального

значення струму збудження від значення електромагнітного моменту, $I_{ЗБ.ОПТ.} = f(M_{EM})$.

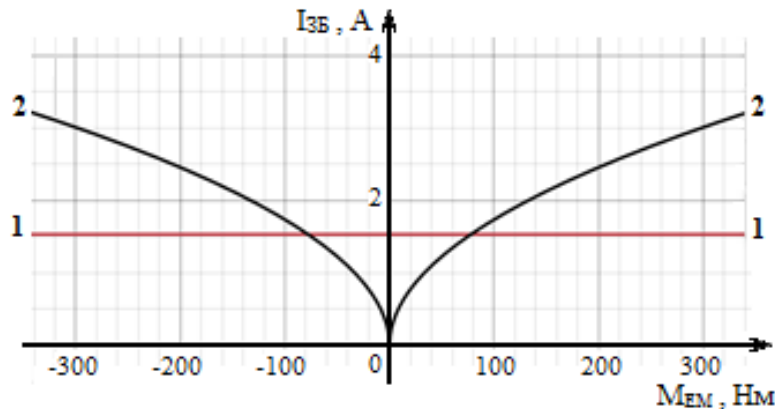


Рис. 1 – Діаграми залежності номінального значення струму збудження і оптимальних значеннях струму збудження ДПС ПН-205 від значення електромагнітного моменту

На рис. 2 за рівнянням (9) побудовано діаграму 1 залежності сумарної потужності втрат електричної енергії на активних опорах обмоток збудження та якоря ДПС типу ПН-205 при номінальному значенні струму збудження від значення електромагнітного моменту, $\Delta P_{\Sigma} =$

$f(M_{EM})$, а за (17) - діаграму 2 залежності сумарної потужності втрат електричної енергії на активних опорах обмоток збудження та якоря ДПС типу ПН-205 при оптимальному значенні струму збудження від значення електромагнітного моменту ДПС, $\Delta P_{\Sigma.ОПТ} = f(M_{EM})$.

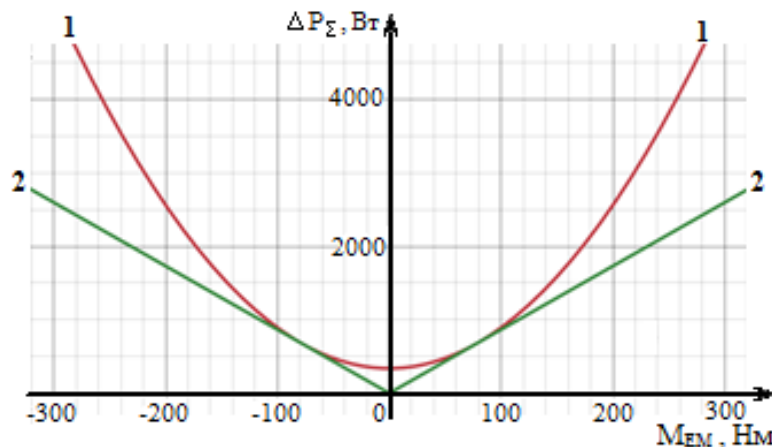


Рис. 2 – Діаграми залежності сумарної потужності втрат електричної енергії на активних опорах обмоток збудження і якоря ДПС ПН-205 від значення електромагнітного моменту

На рис. 3 за рівнянням (18) побудовано діаграму, яка визначає співвідношення сумарної потужності втрат енергії в обмотках збудження і якоря ДПС типу ПН-205 при номінальному та оптимальному значеннях струму збудження від значення електромагнітного моменту ДПС, $\frac{\Delta P_{\Sigma}}{\Delta P_{\Sigma.ОПТ.}} = f(M_{EM})$.

Механічна характеристика ДПС типу ПН-205 при номінальному значенні струму збудження описується формулою (26):

$$\omega = \frac{U_{я.н.}}{C_{ЕН}} - \frac{M_{EM} \cdot R_{я.}}{C_{ЕН}^2} \quad (26)$$

Механічна характеристика ДПС типу ПН-205 при оптимальному значенні струму збудження описується формулою (27):

$$\omega = \frac{U_{я.н.}}{\sqrt{M_{EM} k_E k_{\Phi}} \times \sqrt{\frac{R_{я.}}{R_{ЗБ}}}} - \frac{R_{я.}}{k_E k_{\Phi} \sqrt{\frac{R_{я.}}{R_{ЗБ}}}} \quad (27)$$

На рис. 4 за рівняннями (26) і (27) побудовано механічні характеристики ДПС типу ПН-205 при номінальному значенні струму збудження (діаграма 1) і при оптимальних значеннях струму збудження (діаграма 2).

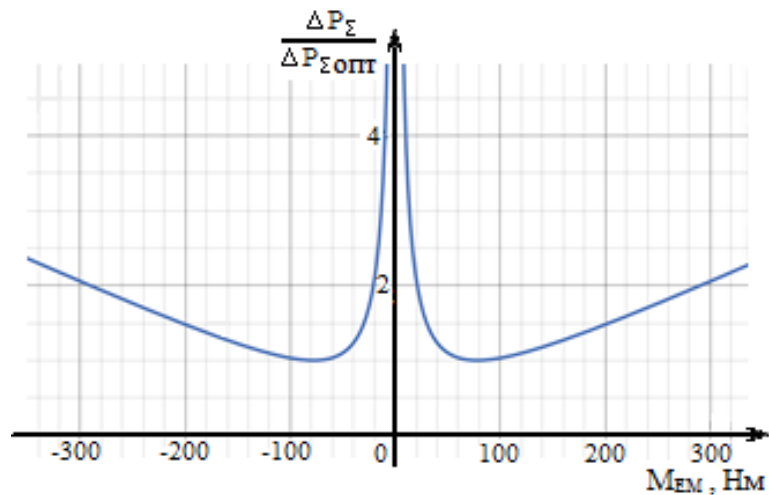


Рис. 3 – Співвідношення сумарної потужності втрат енергії в обмотках збудження і якоря ДПС ПН-205 при номінальному і оптимальних значеннях струму збудження від значення електромагнітного моменту

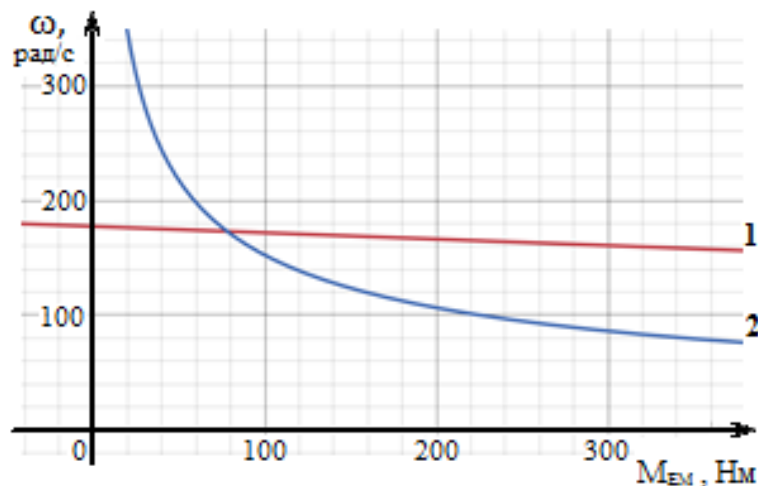


Рис. 4 – Механічні характеристики ДПС ПН-205:
1 - при незмінному номінальному значенні струму збудження;
2 - при оптимальних значеннях струму збудження

Висновки

1. На підставі рівняння (13) і рис.1 (діаграма 2) видно, що оптимальне значення струму збудження є пропорційним кореню квадратному від значення електромагнітного моменту, який розвиває ДПС. Для ДПС ПН-205 значення оптимального струму збудження буде дорівнювати номінальному значенню струму збудження при значенні електромагнітного моменту, яке дорівнює приблизно 80 Нм. Це є приблизно 37% від номінального значення електромагнітного моменту ДПС ПН-205. При більших значеннях електромагнітного моменту, який розвиває ДПС ПН-205, значення оптимального струму збудження буде більше номінального значення струму збудження. При

менших значеннях електромагнітного моменту, який розвиває ДПС ПН-205, значення оптимального струму збудження буде менше номінального значення струму збудження. При нульовому значенні електромагнітного моменту, який розвиває ДПС, оптимальне значення струму збудження дорівнює нулю.

Однак, нагадаємо ще раз, що занадто велике значення струму збудження може призвести до перегріву обмотки збудження двигуна. Тому в загальному випадку максимальне значення струму збудження ДПС має бути обмежено на допустимому рівні. Разом з тим занадто мале значення струму збудження може привести до погіршення комутації колектора двигуна. Тому мінімальне значення струму збудження ДПС також має бути обмежено на допустимому рівні.

2. На підставі розрахунків (24) і (25) видно, що при номінальному значенні електромагнітного моменту ДПС при оптимальному значенні струму збудження сумарна потужність втрат енергії в обмотках збудження і якоря ДПС ПН-205 зменшується на 1057 Вт в порівнянні із сумарною потужністю втрат електричної енергії при номінальному значенні струму збудження. Це дозволяє підвищити номінальне значення ККД двигуна на 3%.

3. На підставі діаграм, показаних на рис. 2 і рис.3, можна зробити висновок, що сумарна потужність втрат електричної енергії в активних опорах обмоток збудження і якоря ДПС при номінальному і оптимальному значеннях струму збудження буде майже однаковою при значенні електромагнітного моменту, який розвиває ДПС ПН-205, від 60 Нм до 100 Нм. Це дорівнює 28%,...,46% від номінального значення електромагнітного моменту. При інших значеннях електромагнітного моменту, який розвиває ДПС ПН-205, сумарна потужність втрат електричної енергії в активних опорах обмоток збудження і якоря ДПС при номінальному значенні струму збудження (діаграма 1 на рис.2) суттєво перевищує значення сумарної потужності втрат електричної енергії при оптимальному значенні струму збудження (діаграма 2 на рис.2).

4. На підставі рівнянь (26) і (27), а також на підставі рис. 4 видно, що при оптимальному значенні струму збудження механічна характеристика двигуна постійного струму з незалежним збудженням набуває форми механічної характеристики двигуна постійного струму з послідовною обмоткою збудження. Це ускладнює застосування розглянутого способу оптимізації струму збудження в замкнених системах регулювання швидкості, оскільки застосування регулятора

швидкості з постійними параметрами не може забезпечити стабільну якість регулювання швидкості при значній зміні струму збудження і магнітного потоку ДПС. Цю задачу можна розв'язати шляхом застосування адаптивного регулятора швидкості [13], [14] або універсального регулятора [15].

Конфлікти інтересів

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів стосовно цього дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, представлені в цій статті.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Наявність даних

Усі дані доступні в числовій або графічній формі в основному тексті рукопису.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що вони не використовували технології штучного інтелекту під час створення цієї роботи.

Внесок авторів

Войтенко В. А.: загальне керівництво, розробка методології, чисельні розрахунки, обробка даних, аналітичні висновки, написання тексту; *Водічев В. А.:* постановка задачі, аналіз та інтерпретація результатів, формулювання висновків; *Калінін О. Г.:* чисельні розрахунки, аналіз даних, підготовка рисунків, редагування тексту статті.

Список використаної літератури

1. Wikipedia. (2018). *Список країн за споживанням електроенергії*. [онлайн] Доступно за адресою: https://uk.wikipedia.org/wiki/Список_країн_за_споживанням_електроенергії [Доступ отримано 24 Мар. 2026].
2. Uaea.com.ua. (2021). *Виробництво та споживання електроенергії в Україні у грудні та за 12 місяців 2020 року — Всеукраїнська Енергетична Асамблея*. [онлайн] Available at: <https://uaea.com.ua/news/pek-news/electricity-2020-12.html> [Доступ отримано 24 березня 2026].
3. SEW-EURODRIVE (2022). *Вимоги до енергоефективності електродвигунів | Новини | SEW-EURODRIVE*. [онлайн] Sew-eurodrive.ua. Доступно за адресою: https://www.sew-eurodrive.ua/kompanija/otdel_novostej_pressa/obzor_novostej/news_root_page_7808-3.html [Доступ отримано 24 березня 2026]. Wikipedia. (2018). *Список країн за споживанням електроенергії*. [онлайн] Доступно за адресою: https://uk.wikipedia.org/wiki/Список_країн_за_споживанням_електроенергії [Доступ отримано 24 Мар. 2026].
4. Бажинов, О.В., Смирнов, О.П., Серіков, С.А. та Двадненко, В.Я. (2008). *Гібридні автомобілі*. Харків: ХНАДУ, с.327.

5. Бажинов, О.В., Смирнов, О.П., Серіков, С.А. та Двадненко, В.Я. (2011). *Синергетичний автомобіль. Теорія і практика*. Харків: ХНАДУ, с.236.
6. Острейко В. Н., Черников Ю. Л. (1981). Экспериментальное исследование электромагнитных параметров токонесящих катушек из ленточной стали. *Изв. Вузov «Электромеханика»*, 4, с.367-373.
7. Калиниченко Ю. С., Кузнецов, А. І. (2004). *Тягові електричні машини. Двигуни постійного струму: Навч. посібник*. Харків: ХНАМГ, с.218.
8. Носков, В., Скороделов, В., Гейко, Г. та Липчанська, О. (2022). Оптимізація режимів роботи тягового привода. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*, 3(69), с.45–48. doi:<https://doi.org/10.26906/sunz.2022.3.045>.
9. Мокін, Б.І. та Мокін, О.Б. (2010). Математичні моделі в задачах оптимізації електропривода трамвая при його сталому завантаженні. *Вісник Вінницького політехнічного інституту* [онлайн], 2, с.57–61. Доступно за адресою: <http://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/55> [Доступ отримано 24 березня 2026].
10. Мокін, Б.І. та Мокін, О.Б. (2010). Математична модель кривої намагнічування електричного двигуна постійного струму з послідовним збудженням для задач оптимізації. *Вісник Вінницького політехнічного інституту* [онлайн], 1, с.рр.45–47. Доступно за адресою: <http://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/8> [Доступ отримано 24 березня 2026].
11. Vozniak, A. and Kolisnyk, M. (2019). Optimization of pulse controlling of engine stopping. *Bulletin of Lviv National Agrarian University. Agroengineering Research*, (23), pp.95–99. doi:<https://doi.org/10.31734/agroengineering2019.23.095>.
12. Ципленков Д.В., Іванов О.Б., Бобров О.В., Кузнецов В.В., Артемчук В.В., Баб'як М.О.(2020). *Проектування електричних машин : навч. посіб.* Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». Дніпро: НТУ ДП, С.408. Доступно за адресою: <https://vde.nmu.org.ua/ua/lib/ПроектированиеЕМ.pdf> [Доступ отримано 24 березня 2026].
13. Islamov, A.V. and Repnikova, N.B. (2014). Synthesis of nonlinear control systems with an unknown state vector. *Electronics and Communications*, 19(3), pp.106–111. doi:<https://doi.org/10.20535/2312-1807.2014.19.3.141482>.
14. Dastaviz, A. and Binazadeh, T. (2018). Simultaneous stabilization for a collection of uncertain time-delay systems using sliding-mode output feedback control. *International Journal of Control*, 93(9), pp.2135–2144. doi:<https://doi.org/10.1080/00207179.2018.1543897>.
15. Ahmed, M.M. and Vodichev, V. (2021). Simulation Study of Electric Drive and Industrial Plants with New Smart Controller. *2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, pp.1–6. doi:<https://doi.org/10.1109/mees52427.2021.9598797>.

References

1. Wikipedia. (2018). *Spysok krayin za spozhyvanniam elektroenerhiyi [List of countries by electricity consumption]*. [online] Available at: https://uk.wikipedia.org/wiki/Список_країн_за_споживанням_електроенергії [Accessed 24 March 2026].
2. Uaea.com.ua. (2021). *Vyrobnytstvo ta spozhyvannya elektroenerhiyi v Ukraini u hrudni ta za 12 misyatsiv 2020 roku [Electricity production and consumption in Ukraine in December and for 12 months of 2020] — Vseukrayins'ka enerhetychna asambleya [All-Ukrainian Energy Assembly]*. [online] Available at: <https://uaea.com.ua/news/pek-news/electricity-2020-12.html> [Accessed 24 March 2026].
3. SEW-EURODRIVE (2022). *Vymohy do enerhoefektyvnosti elektrodyhuniv | Novyny | SEW-EURODRIVE [Energy efficiency requirements for electric motors | News | SEW-EURODRIVE]*. [online] Sew-eurodrive.ua. Available at: https://www.sew-eurodrive.ua/kompanija/otdel_novostej_pressa/obzor_novostej/news_root_page_7808-3.html [Accessed 24 March 2026].
4. Bazhynov, O.V., Smyrnov, O.P., Syerikov, S.A. and Dvadnenko, V.YA. (2008). *Hibrydni avtomobili, [Hybrid Cars]*. Kharkiv: KHNADU, p.327.5.
5. Bazhynov, O.V., Smirnov, O.P., Serikov, S.A. and Dvadnenko, V.Ya. (2011). *Synerhetychnyy avtomobil'. Teoriya i praktyka. [Synergetic car. Theory and practice]*. Kharkiv: KhNADU, p.236
6. Ostreiko V. N., Chernikov Yu. L. (1981). Eksperimental'noye issledovaniye elektromagnitnykh parametrov tokonesushchikh katushek iz polosovoy stali. [Experimental study of electromagnetic parameters of current-carrying coils made of strip steel]. *Izv. Vuzov "Elektromekhanika"[Izvestiya Universiteta «Elektromekhanika»]*, 4, pp.367-373.

7. Kalinichenko Yu. S., A. I. Kuznetsov, A. I. (2004). *Tyahovi elektrychni mashyny. Dvyhuny postiynoho strumu: Navch. posibnyk [Traction electric machines. Direct current motors: Textbook]*. Kharkiv: KhNAMG, p.218.
8. Noskov, V., Skorodielov, V., Heiko, H. and Lipchanska, O. (2022). OPTYMIZATSIYA REZHYMIV ROBOTY TYAHOVOHO PRYVODU [OPTIMIZATION OF OPERATING MODES OF A TRACTION DRIVE]. *Systemy keruvannya, navihatsiyi ta zv'yazku. Zbirnyk naukovykh prats' [Control, navigation and communication systems. Collection of scientific papers]*, 3(69), pp.45–48. doi:<https://doi.org/10.26906/sunz.2022.3.045>.
9. Mokin, B.I. and Mokin, O.B. (2010). Matematychni modeli v zadachakh optymizatsiyi elektropryvoda tramvaya pry yoho stalomu zavantazhenni [Mathematical models in the optimization problems of the electric drive of a tram under its constant load]. *Visnyk Vinnyts'koho politekhnichnoho instytutu [Bulletin of the Vinnytsia Polytechnic Institute]*. [online], 2, pp.57–61. Available at: <http://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/55> [Accessed March 24, 2026].
10. Mokin, B.I. and Mokin, O.B. (2010). Matematychna model' kryvoyi namahnichuvannya elektrodvyhuna postiynoho strumu z poslidoynym zbudzhennyam dlya zadach optymizatsiyi [Mathematical model of the magnetization curve of a DC electric motor with sequential excitation for optimization problems]. *Visnyk Vinnyts'koho politekhnichnoho instytutu [Bulletin of Vinnytsia Polytechnic Institute]* [online], 1, pp.45–47. Available at: <http://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/8> [Accessed March 24, 2026].
11. Vozniak, A. and Kolisnyk, M. (2019). Optimization of pulse controlling of engine stopping. *Bulletin of Lviv National Agrarian University. Agroengineering Research*, (23), pp.95–99. doi:<https://doi.org/10.31734/agroengineering2019.23.095>.
12. Tsyplenkov D.V., Ivanov O.B., Bobrov O.V., Kuznetsov V.V., Artemchuk V.V., Babyak M.O. (2020). *Design of electric machines: a textbook*. National Technical University "Dnipropetrovsk Polytechnic". Dnipro: NTU DP, p.408. Available at: <https://vde.nmu.org.ua/lib/%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%B5%D0%BA%D1%82%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B5%D0%95%D0%9C.pdf> [Accessed March 24, 2026].
13. Islamov, A.V. and Repnikova, N.B. (2014). Synthesis of nonlinear control systems with an unknown state vector. *Electronics and Communications*, 19(3), pp.106–111. doi:<https://doi.org/10.20535/2312-1807.2014.19.3.141482>.
14. Dastaviz, A. and Binazadeh, T. (2018). Simultaneous stabilization for a collection of uncertain time-delay systems using sliding-mode output feedback control. *International Journal of Control*, 93(9), pp.2135–2144. doi:<https://doi.org/10.1080/00207179.2018.1543897>.
15. Ahmed, M.M. and Vodichev, V. (2021). Simulation Study of Electric Drive and Industrial Plants with New Smart Controller. *2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, pp.1–6. doi:<https://doi.org/10.1109/mees52427.2021.9598797>.

Отримано (Received) 15.12.2025

Отримано після доопрацювання (Received after revision) 23.02.2026

Прийнято (Accepted) 24.03.2026

Опубліковано (Published) 23.04.2026

Optimization of DC Motor Power losses by Controlling the Excitation Current

Volodymyr Voytenko¹, Ph.D, Associate Professor

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2525-6913>; e-mail: voitenko@op.edu.ua

Volodymyr Vodichev¹, Doctor of Technical Sciences, Professor

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7204-1149>; e-mail: vva@eei.opu.ua,

Alexander Kalinin¹, electrical engineer

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2654-9969>; e-mail: kalinin.a.g@op.edu.ua

¹ Національний університет «Одеська політехніка»

Abstract. Based on the mathematical model of a DC motor with independent excitation, an equation was obtained for the dependence of the total power of electrical energy losses on the active resistance of the armature winding and the excitation winding of a DC motor on the value of the excitation current and on the value of the electromagnetic torque developed by the motor. A formula was also obtained that determines the optimal value of the excitation current at which a DC motor with independent excitation develops the required value of the electromagnetic torque at the minimum value of the total power of electrical energy losses on the active resistance of the armature winding and the excitation winding. A diagram of the dependence of the optimal value of the excitation current on the value of the electromagnetic torque was constructed. A formula was obtained that determines the dependence of the value of the total power of electrical energy losses on the active resistance of the armature winding and on the active resistance of the excitation winding of a DC motor on the value of the electromagnetic torque developed by the motor, at the nominal value of the excitation current and at the optimal value of the excitation current. The dependence diagrams of the total power of electrical energy losses on the active resistance of the armature winding and on the active resistance of the excitation winding of a DC motor on the value of the electromagnetic torque at the nominal value of the excitation current and at the optimal value of the excitation current have been constructed. The mechanical characteristics of a DC motor with independent excitation have been constructed at the nominal value of the excitation current and at the optimal value of the excitation current.

Keywords: DC motor, independent excitation, power, electrical energy losses, active resistance, winding, armature, optimal current, mechanical characteristics.

Article citation: Voitenko V. A., Vodichev V. A., Kalinin O. G. (2026). Optimization of DC motor power losses by excitation current regulation. Electrical and Computer Systems. 2026. No. 45(121), pp. 89-98. doi:<https://doi.org/10.15276/eltecs.45.121.2026.9>

Про авторів (About the authors)



Войтенко Володимир Андрійович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електромеханічної інженерії, Національний університет «Одеська політехніка»; просп. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна.

E-mail: voitenko@op.edu.ua, тел.: +380 48 705 8467

Volodymyr Voytenko, Ph.D, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electromechanical Engineering, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Ave., Odesa, 65044, Ukraine.

E-mail: voitenko@op.edu.ua; ph.: +380 48 705 8467

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2525-6913>



Водічев Володимир Анатолійович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри електромеханічної інженерії, Національний університет «Одеська політехніка»; просп. Шевченка, 1, Одеса 65044, Україна.

E-mail: vva@eei.opu.ua, тел. +38(050)2347722

Volodymyr Vodichev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Electromechanical Engineering, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Ave., Odesa, 65044, Ukraine.

E-mail: vva@eei.opu.ua, tel. +38(050)2347722,

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7204-1149>



Калінін Олександр Георгійович, старший викладач кафедри електромеханічної інженерії, Національний університет «Одеська політехніка»; просп. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна.

E-mail: kalinin.a.g@op.edu.ua, тел. +380 50 392 1298

Olexander Kalinin, Senior Lecturer of the Department of Electromechanical Engineering, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Ave., Odesa, 65044, Ukraine.

E-mail: kalinin.a.g@op.edu.ua, tel. +380 50 392 1298

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2654-9969>