

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЧЕРНІГІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

БАЙДА ВЛАДИСЛАВ ДМИТРОВИЧ

УДК [004.94:004.75:621.314]:004.421(043.5)

ДИСЕРТАЦІЯ

МЕТОДИ ТА ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ДІАГНОСТУВАННЯ ВІДМОВ У
НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧАХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ОСНОВІ
ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ

122 – Комп'ютерні науки

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії (PhD)

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ Байда Владислав Дмитрович

Науковий керівник:

ВЕЛІГОРСЬКИЙ Олександр Анатолійович,
кандидат технічних наук, професор

ЧЕРНІГІВ – 2026

АНОТАЦІЯ

Байда Владислав Дмитрович. Методи та інформаційна технологія діагностування відмов у напівпровідникових перетворювачах електроенергії на основі цифрових двійників. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 – «Комп'ютерні науки» (12 – «Інформаційні технології»). – Національний університет «Чернігівська політехніка», МОН України, Чернігів, 2026.

У дисертаційній роботі розв'язано важливе наукове завдання підвищення ефективності онлайн-виявлення та ідентифікації відмов у напівпровідникових перетворювачах електроенергії шляхом розроблення нових методів та інформаційної технології діагностування на основі цифрових двійників, що забезпечують автоматизовану діагностику дефектів компонентів в онлайн-режимі без необхідності вимірювань працездатності окремих елементів пристрою. Запропонований підхід поєднує метаевристичну оптимізацію для ідентифікації паразитних параметрів компонентів як складових математичної моделі (калібрування цифрового двійника під конкретний екземпляр пристрою), якісний аналіз відхилень вихідних сигналів для локалізації несправностей та технології дистанційних лабораторій для експериментальної верифікації.

Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та шести додатків.

У першому розділі виконано аналіз сучасних підходів до діагностики електронних пристроїв, зокрема методів на основі вбудованого самотестування, сигнатурного аналізу та машинного навчання. Розглянуто концепцію цифрових двійників як інструменту діагностики, проаналізовано методи побудови цифрових двійників та ідентифікації параметрів моделей силових електронних перетворювачів. Досліджено сучасний стан технологій дистанційних лабораторій та їхній потенціал для верифікації діагностичних систем. Виявлено основні обмеження існуючих підходів. Сформульовано мету і виконано постановку задач дослідження.

У другому розділі розроблено новий інтегрований метод онлайн-

діагностування напівпровідникових перетворювачів електроенергії на основі цифрового двійника. Метод базується на представленні вхідних та вихідних параметрів пристрою у вигляді векторів і формуванні таблиці відповідності між відхиленнями вихідних сигналів від еталонних та можливими причинами несправностей. Еталонні значення отримуються за допомогою цифрового двійника, відкаліброваного під конкретний екземпляр пристрою. Запропоновано підхід із дискретними станами відхилень, що забезпечує стійкість до шумів вимірювань та низькі вимоги до обчислювальних ресурсів на етапі експлуатації, оскільки всі ресурсомісткі обчислення виконуються на етапі ініціалізації системи. Систематизовано чотири основні методи генерації таблиць відповідності: систематичного моделювання, аналітичного виводу, формалізації експертних знань та експериментальний метод, а також гібридний підхід, який за результатами якісного порівняння рекомендується для практичних застосувань.

У третьому розділі обґрунтовано вибір генетичного алгоритму для розв'язання задачі ідентифікації паразитних параметрів силового перетворювача постійного струму для калібрування його цифрового двійника. Запропоновано визначати еталонний сигнал для калібрування за критерієм рівновіддаленості його показників від граничних значень експериментальної вибірки, завдяки чому відхилення відкаліброваної моделі є симетричними і безпосередньо використовуються як початкові пороги діагностування. Проведено порівняльний аналіз градієнтних методів, методу оптимізації рою частинок, алгоритму «сірого вовка» та генетичного алгоритму. Сформульовано математичну модель задачі ідентифікації як задачу глобальної мінімізації відхилення між виходами моделі та реального пристрою. Введено підхід із логарифмічним кодуванням генів, що забезпечує ефективне оброблення параметрів, які охоплюють до 9 порядків величини. Апробовано метод на перетворювачі постійного струму з ідентифікацією семи паразитних параметрів на основі експериментальних вимірювань.

У четвертому розділі отримали подальший розвиток технологічні підходи до формування архітектури дистанційних інженерних лабораторій: розроблено метод багатокритеріального порівняльного аналізу інформаційних технологій їх побудови,

що дає змогу перейти від емпіричного до науково аргументованого вибору технологічної платформи. Запропоновано систему з шести критеріїв із обґрунтованими ваговими коефіцієнтами: рівень технологій, оновлення та підтримка, можливість інтеграції з LMS, простота архітектури, швидкодія в режимі реального часу та простота конфігурації. На основі методу проведено кількісне порівняння шести технологій дистанційних лабораторій, за результатами якого технологію LabDiscoveryEngine визначено як найбільш придатну для побудови нових дистанційних лабораторій.

У п'ятому розділі виконано експериментальну валідацію запропонованих методів. Розроблено метод порівняння інформаційних технологій бекенду для взаємодії з LabDiscoveryEngine, завдяки чому кількісно обґрунтовано вибір програмної платформи для реалізації дистанційної лабораторії. Розроблено програмно-апаратний комплекс дистанційної лабораторії силової електроніки на основі технології LabDiscoveryEngine для напівпровідникових перетворювачів постійного струму. Реалізовано інтеграцію цифрового двійника, побудованого з використанням PySpice та Ngspice, із системою діагностики на основі запропонованого методу. Тестування на реальному обладнанні підтвердило 100% виявлення факту відмови та коректне визначення причини у 99,5-100% випадків залежно від ступеня відхилення параметрів. Аналіз швидкодії даної реалізації показав, що максимальний час виконання повної процедури діагностування становить 1,5 мілісекунд, причому він здебільшого є зумовленим передачею осцилограм по USB, а всі інші етапи в сумі тривають десятки-сотні мікросекунд. Створено марковську модель готовності напівпровідникових перетворювачів енергії, розв'язок якої кількісно підтверджує, що досягнуте підвищення ефективності діагностування забезпечує зростання готовності перетворювача.

Отримані результати мають практичне значення, оскільки запропоновані інформаційні технології та методи можуть бути використані для побудови систем автоматизованої діагностики та предиктивного технічного обслуговування силових електронних перетворювачів, а також як базова архітектура для створення дистанційних лабораторій електронного спрямування.

Ключові слова: цифровий двійник; інформаційна технологія; генетичний алгоритм; векторна модель; метаевристична оптимізація; моделювання; діагностування пристроїв силової електроніки; перетворювач постійного струму; ідентифікація паразитних параметрів; якісний аналіз несправностей; дистанційна лабораторія; предиктивне технічне обслуговування; виявлення відмов; класифікація несправностей; машинне навчання.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці з основними науковими результатами дисертації

1. V. Baida, O. Velihorskyi, M. Khomenko, B. Velihorskyi. Back-End Technology of the Remote Power Electronics Laboratory Based on LabDiscoveryEngine, Mathematical Modeling and Simulation of Systems. MODS 2024. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 1391., Springer, Cham. pp.379-392. https://doi.org/10.1007/978-3-031-90735-7_29, Scopus, Web of Science (ISSN 2367-3370). (Особистий внесок здобувача: розробка багаторівневої архітектури бекенду віддаленої лабораторії, обґрунтування вибору технології Node.js, проєктування прикладних протоколів двонаправленого обміну даними між клієнтом, сервером та мікроконтролером, реалізація інтеграції з RLMS LabDiscoveryEngine, реалізація взаємодії Raspberry Pi з цифровим осцилографом Analog Discovery 2).
2. Велігорський, Б., Байда, В., Хоменко, М.. Практичні аспекти створення інтерфейсу користувача віддаленої лабораторії електроніки, Технічні науки та технології, 2025, №1 (39), 206–217. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-1\(39\)-206-217](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-1(39)-206-217), Фахове видання, (ISSN 2411-5363). (Особистий внесок здобувача: розробка серверної частини віддаленої лабораторії, проєктування архітектури системи, налаштування середовища розробки та ініціалізація фронтенд-застосунку як частини монорепозиторію).
3. В. Байда, О. Велігорський. Методика порівняння інформаційних технологій побудови дистанційних лабораторій апаратного забезпечення, Технічні науки та технології, 2024, №4 (38), с. 172-188. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-4\(38\)-172-188](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-4(38)-172-188), Фахове видання, (ISSN 2411-5363). (Особистий внесок здобувача: аналіз та систематизація архітектур існуючих систем дистанційних лабораторій апаратного забезпечення, розробка методики їх порівняння за комплексом критеріїв з ваговими коефіцієнтами, проведення порівняльного аналізу та обґрунтування вибору оптимальної технології).
4. В. Байда, О. Велігорський. Методологія діагностики апаратного забезпечення

- з використанням інформаційної технології цифрового двійника, Технічні науки та технології, 2025, №2 (40), с. 234-253. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2\(40\)-234-253](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-234-253), Фахове видання, (ISSN 2411-5363). (Особистий внесок здобувача: розробка методики діагностики електронного обладнання на основі векторного представлення параметрів, формалізація таблиць відповідності та механізму сірої зони, розробка алгоритму реалізації методики, систематизація методів генерації таблиць відповідності).
5. В. Байда, О. Велігорський Ідентифікація паразитних параметрів моделі перетворювача постійного струму генетичним алгоритмом, Технічні науки та технології, 2025, №4 (42), с. 165-186, [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4\(42\)-165-186](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4(42)-165-186), Фахове видання, (ISSN 2411-5363). (Особистий внесок здобувача: розробка методу ідентифікації паразитних параметрів моделі перетворювача постійного струму, реалізація генетичного алгоритму з багатокритеріальною функцією пристосованості, проведення експериментальних вимірювань та статистичного аналізу даних, верифікація оптимізованої моделі на експериментальній вибірці).
6. В. Байда, О. Велігорський Розробка та практична імплементація інформаційної технології діагностики перетворювачів постійного струму на основі фізично-орієнтованих цифрових двійників, Технічні науки та технології, 2026, №1(43), с. 161–182. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1\(43\)-161-182](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-161-182), Фахове видання, (ISSN 2411-5363). (Особистий внесок здобувача: розробка математичної моделі перетворювача з урахуванням паразитних параметрів у PySpice, формування таблиці відповідності через моделювання шести ступенів відносних змін параметрів, практична імплементація та експериментальна валідація методології діагностики на базі 6705 вимірювань у системі дистанційної лабораторії LabDiscoveryEngine).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

1. Байда В., Іванець С. Віддалені лабораторії по роботі з апаратними засобами вбудованих систем. Новітні технології у науковій діяльності і навчальному процесі: Збірник тез Всеукраїнська науково-практична конференція

- студентів, аспірантів та молодих учених (м. Чернігів, 19-20 квіт. 2023 р.): збірник тез доповідей – Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2023. – С. 247-249. (Особистий внесок здобувача: обґрунтовано доцільність створення дистанційних лабораторій для роботи з апаратними засобами, виконано огляд та порівняльний аналіз існуючих платформ віддалених лабораторій, визначено їх функціональні можливості, архітектурні рішення та особливості організації доступу до реального обладнання).
2. Байда В., Іванець С. Implementation of the server part of a remote power electronics laboratory based on the labdiscoveryengine system. Юність науки – 2024: збірник тез доповідей XIV Міжнар. наук.-практ. конф. студ., асп. і мол. вчен. (м. Чернігів, 24-26 квіт. 2024 р.). – Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2024. – С. 1046-1047. (Особистий внесок здобувача: розроблення архітектури та програмна реалізація серверної частини віддаленої лабораторії силової електроніки на Raspberry Pi, обґрунтування вибору протоколу WebSocket та реалізація власного протоколу обміну (що використовує UART) з мікроконтролером STM32 для керування перетворювачем постійного струму).
3. V. Baida, S. Ivanets. Building a Virtual Hardware Laboratory with FPGA and Raspberry Pi Integration. V International Scientific and Practical Conference «Theoretical and Applied Aspects of Device Development on Microcontrollers and FPGAs» MC&FPGA-2023, Kharkiv, Ukraine, June 22-23, 2023. – Kharkiv, NURE. – 36-37 pp. (Особистий внесок здобувача: запропоновано архітектуру браузерної системи віддаленої лабораторії FPGA, обґрунтовано вибір Raspberry Pi як апаратної платформи та розроблено структурну схему взаємодії сервера, Raspberry Pi і FPGA).
4. Baida V.D., Velihorsky O.A., Kazymyr V.V. Laboratory platform for remote hardware experimentation., Науково-практична конференція обдарованої учнівської та студентської молоді «Новітні технології сучасного суспільства НТСС-2024», Національний університет «Чернігівська політехніка», 2024, С. 185-186. (Особистий внесок здобувача: розроблення архітектури

платформи віддаленої лабораторії та реалізація її серверної частини на Go з підтримкою дистанційного програмування MCU/FPGA і керування Analog Discovery 2).

5. O. Velihorskyi, M. Khomenko, V. Baida, B. Velihorskyi, R. Chakirov, DC-DC Power Converters Remote Laboratory Based on LabDiscoveryEngine, 2025 IEEE PES 35th Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), 29 September - 01 October 2025, pp. 1-5, <https://doi.org/10.1109/AUPEC66173.2025.11219557> Scopus, Web of Science (ISSN 2474-1507). (Особистий внесок здобувача: розробка серверної частини дистанційної лабораторії, реалізація двонаправленого обміну даними між вебклієнтом, експериментальним сервером на базі Raspberry Pi та мікроконтролером за протоколом WebSocket з використанням підходу Data Transfer Objects, інтеграція дистанційної лабораторії з RLMS LabDiscoveryEngine, реалізація програмної взаємодії з Analog Discovery 2 та потокової передачі осцилографічних даних у вебінтерфейс).

ABSTRACT

Baida Vladyslav. Methods and information technology for diagnosing failures in semiconductor power converters based on digital twins. – Qualifying scientific work (manuscript)

PhD thesis under Specialty 122 – Computer Science (12 – Information technologies). – Chernihiv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Chernihiv, 2026.

The dissertation solves an important scientific problem of improving the effectiveness of online fault detection and identification in semiconductor power converters by developing new methods and an information technology for diagnostics based on digital twins, which provide automated online diagnosis of component defects without the need to measure the operability of individual elements of the device. The proposed approach combines metaheuristic optimization for identifying the parasitic parameters of components as constituents of the mathematical model (calibration of the digital twin to a specific device unit), qualitative analysis of output signal deviations for fault localization, and remote laboratory technologies for experimental verification.

The dissertation consists of an introduction, five chapters, conclusions, a list of references, and five appendices.

The first chapter analyzes current approaches to the diagnostics of electronic devices, in particular methods based on built-in self-test, signature analysis, and machine learning. The concept of digital twins as a diagnostic tool is considered, and methods for constructing digital twins and identifying the model parameters of power electronic converters are analyzed. The current state of remote laboratory technologies and their potential for verifying diagnostic systems are investigated. The main limitations of existing approaches are identified. The research goal is formulated and the research tasks are stated.

The second chapter develops a new integrated method for online diagnostics of semiconductor power converters based on a digital twin. The method is based on representing the input and output parameters of the device as vectors and forming a correspondence table between the deviations of the output signals from their reference

values and the possible causes of faults. The reference values are obtained using a digital twin calibrated to the specific device unit. An approach with discrete deviation states is proposed, which provides robustness to measurement noise and low computational resource requirements during operation, since all resource-intensive computations are performed at the system initialization stage. Four main methods for generating correspondence tables are systematized: systematic simulation, analytical derivation, formalization of expert knowledge, and the experimental method, as well as a hybrid approach, which, based on the results of a qualitative comparison, is recommended for practical applications.

The third chapter substantiates the choice of a genetic algorithm for solving the problem of identifying the parasitic parameters of a DC-DC power converter in order to calibrate its digital twin. It is proposed to determine the reference signal for calibration by the criterion of equidistance of its indicators from the boundary values of the experimental sample, owing to which the deviations of the calibrated model are symmetric and are used directly as the initial diagnostic thresholds. A comparative analysis of gradient-based methods, particle swarm optimization, the grey wolf optimizer, and the genetic algorithm is carried out. The mathematical model of the identification problem is formulated as a problem of global minimization of the deviation between the outputs of the model and the real device. An approach with logarithmic gene encoding is introduced, which ensures efficient handling of parameters spanning up to 9 orders of magnitude. The method is validated on a DC-DC converter with the identification of seven parasitic parameters based on experimental measurements.

The fourth chapter further develops technological approaches to designing the architecture of remote engineering laboratories: a method for multi-criteria comparative analysis of the information technologies used to build them is devised, which makes it possible to move from an empirical to a scientifically substantiated choice of technology platform. A system of six criteria with substantiated weighting coefficients is proposed: technology level, updates and support, LMS integration capability, architectural simplicity, real-time performance, and ease of configuration. Based on the method, a quantitative comparison of six remote laboratory technologies is carried out, as a result of which the LabDiscoveryEngine technology is identified as the most suitable for building new remote

laboratories.

The fifth chapter presents the experimental validation of the proposed methods. A method for comparing backend information technologies for interaction with LabDiscoveryEngine is developed, which provides a quantitative justification for the choice of the software platform for implementing the remote laboratory. A hardware-software complex of a remote power electronics laboratory based on the LabDiscoveryEngine technology for semiconductor DC-DC converters is developed. The integration of a digital twin built using PySpice and Ngspice with a diagnostic system based on the proposed method is implemented. Testing on real equipment confirmed 100% detection of the fact of failure and correct determination of its cause in 99.5–100% of cases, depending on the degree of parameter deviation. A performance analysis of this implementation showed that the maximum execution time of the complete diagnostic procedure is 1.5 milliseconds, most of which is due to the transfer of waveforms over USB, while all other stages together take tens to hundreds of microseconds. A Markov availability model of semiconductor power converters is created, the solution of which quantitatively confirms that the achieved improvement in diagnostic effectiveness leads to an increase in converter availability.

The obtained results are of practical significance, since the proposed information technologies and methods can be used to build systems for automated diagnostics and predictive maintenance of power electronic converters, as well as a baseline architecture for creating remote laboratories in the field of electronics.

Keywords: digital twin; information technology; genetic algorithm; vector model; metaheuristic optimization; simulation; diagnostics of power electronics devices; DC-DC converter; identification of parasitic parameters; qualitative fault analysis; remote laboratory; predictive maintenance; fault detection; fault classification; machine learning.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	2
СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ.....	6
ABSTRACT.....	10
ЗМІСТ.....	13
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	16
ВСТУП.....	20
РОЗДІЛ 1. Оглядовий розділ.....	28
1.1 Сучасні підходи до діагностики електронного обладнання.....	28
1.1.1 Основні типи несправностей в силовій електроніці.....	30
1.1.2 Традиційні методи діагностики та їх обмеження.....	34
1.1.3 Еволюція методів діагностики в контексті Industry 4.0.....	38
1.1.4 Діагностика силової електроніки та вбудованих систем.....	42
1.1.5 Існуючі проблеми у діагностиці напівпровідникових пристроїв силової електроніки.....	44
1.1.6 Існуючі модельно-орієнтовані підходи діагностики.....	47
1.2 Цифрові двійники як інструмент діагностики електронного обладнання.....	49
1.2.1 Концепція цифрових двійників.....	50
1.2.2 Застосування цифрових двійників для діагностики	56
1.2.3 Методи побудови цифрових двійників електронного обладнання.....	58
1.2.4 Методи ідентифікації та оптимізації параметрів моделей	59
1.3 Дистанційні лабораторії як засіб взаємодії з електронним обладнанням.....	61
1.3.1 Концепція та еволюція дистанційних лабораторій.....	62
1.3.2 Застосування дистанційних лабораторій	63
1.3.3 Технології побудови дистанційних лабораторій	67
1.3.4 Проблема вибору технологій для дистанційних лабораторій.....	69
1.4 Висновки до розділу 1.....	71
РОЗДІЛ 2. Інтегрований метод онлайн-діагностування напівпровідникових перетворювачів електроенергії на основі цифрових двійників.....	74
2.1 Математичні засади методу векторної діагностики.....	75
2.2 Формалізація діагностичного алгоритму на основі таблиць відповідності	83
2.3 Методи генерації таблиць відповідності.....	94
2.3.1 Метод систематичного моделювання.....	94

2.3.2	Метод аналітичного виводу для простих схем	95
2.3.3	Метод формалізації експертних знань	95
2.3.4	Експериментальний метод	95
2.3.5	Гібридний підхід до генерації таблиць	96
2.3.6	Порівняльний аналіз запропонованих методів генерації таблиці відповідності	96
2.4	Програмна реалізація методу для перетворювача постійного струму, що понижує напругу 98	
2.5	Побудова таблиці відповідності для понижуючого перетворювача	102
2.6	Висновки до розділу 2	103
РОЗДІЛ 3. Калібрування цифрового двійника та інформаційна технологія діагностування відмов		106
3.1	Вибір алгоритму ідентифікації паразитних параметрів силового перетворювача	106
3.2	Метод калібрування цифрового двійника перетворювача постійного струму	114
3.3	Структура інформаційної технології діагностування відмов	133
3.4	Висновки до розділу 3	135
РОЗДІЛ 4. Вибір технології віддалених лабораторій для імплементації інформаційної технології діагностування відмов		138
4.1	Аналіз і порівняння найбільш поширених систем дистанційних лабораторій	139
4.2	Метод порівняння технологій дистанційних лабораторій	152
4.3	Апробація методу порівняння технологій дистанційних лабораторій	154
4.4	Висновки до розділу 4	157
РОЗДІЛ 5. Експериментальна частина		159
5.1	Опис системи	159
5.1.1	Лабораторія силової електроніки	160
5.1.2	Архітектура дистанційної лабораторії	161
5.1.3	Реалізація інформаційної технології бекенду дистанційної лабораторії	164
5.2	Тестування точності визначення наявності несправностей та їх причин	172
5.3	Аналіз та тестування швидкодії	174
5.4	Оцінювання ефективності онлайн-діагностування за показником готовності перетворювача	177
5.4.1	Критерій виконання мети та обґрунтування методу оцінювання	177
5.4.2	Марковська модель готовності перетворювача	178
5.5	Висновки до розділу 5	180
ВИСНОВКИ		184
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ		189

ДОДАТКИ.....	209
Додаток А. Довідки про впровадження.....	209
Додаток Б. Побудова таблиці відповідності для перетворювача електроенергії.....	211
Додаток В. Тестування точності розробленої системи діагностування відмов	215
Додаток Г. Розв’язок та результат марковської моделі готовності	223
Додаток Д. Аналіз чутливості марковської моделі готовності	229
Додаток Е. Список праць здобувача за темою дисертації.....	231

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- AI – Artificial Intelligence – штучний інтелект
- API – Application Programming Interface – програмний інтерфейс
- AWS – Amazon Web Services – хмарні сервіси Amazon
- BGA – Ball Grid Array – тип корпусу мікросхеми з матрицею кулькових виводів
- BIST – Built-In Self-Test – вбудоване самотестування
- CCM – Continuous Conduction Mode – режим безперервної провідності
- CNN – Convolutional Neural Network – конволюційна нейронна мережа
- CRDT – Conflict-free Replicated Data Type – безконфліктні репліковані типи даних
- DC-DC – Direct Current to Direct Current converter – перетворювач постійного струму
- DCM – Discontinuous Conduction Mode – режим переривчастих струмів
- DCR – DC Resistance – опір котушки індуктивності на постійному струмі
- DT – Digital Twin – цифровий двійник
- DTO – Data Transfer Object – об'єкт передачі даних
- EKF – Extended Kalman Filter – розширений фільтр Калмана
- EOL – End of Life – кінець терміну служби
- ESR – Equivalent Series Resistance – еквівалентний послідовний опір
- FCT – Functional Testing – функціональне тестування
- FDI – Fault Detection and Isolation – виявлення та ізоляція несправностей
- FPGA – Field-Programmable Gate Array – програмована логічна інтегральна схема
- FREE – Framework for Remote Experiments in Education – фреймворк для дистанційних експериментів в освіті
- GA – Genetic Algorithm – генетичний алгоритм
- GWO – Grey Wolf Optimizer – оптимізація стаєю сірих вовків
- HIL – Hardware-in-the-Loop – апаратне моделювання в контурі
- HTTP – Hypertext Transfer Protocol – протокол передачі гіпертексту

I2C – Inter-Integrated Circuit – міжмікросхемний інтерфейс

ICT – In-Circuit Testing – внутрішньосхемне тестування

IGBT – Insulated-Gate Bipolar Transistor – біполярний транзистор з ізольованим затвором

IoT – Internet of Things – інтернет речей

ISA – iLab Shared Architecture – спільна архітектура iLab

JSON – JavaScript Object Notation – формат обміну даними

JTAG – Joint Test Action Group – стандартизований інтерфейс для тестування (IEEE 1149.1)

LLC – LLC Resonant Converter – резонансний перетворювач типу LLC

LMS – Learning Management System – система управління навчанням

LSTM – Long Short-Term Memory – мережа довгої короткострокової пам'яті

LTI – Learning Tools Interoperability – стандарт інтеграції навчальних інструментів

LXI – LAN eXtensions for Instrumentation – стандарт мережевих вимірювальних приладів

MCU – Microcontroller Unit – мікроконтролер

MEMS – Micro-Electro-Mechanical Systems – мікроелектромеханічні системи

MOSFET – Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor – польовий транзистор з ізольованим затвором

MQTT – Message Queuing Telemetry Transport – протокол обміну повідомленнями для IoT

MSE – Mean Squared Error – середньоквадратична похибка

MTBF – Mean Time Between Failures – середній час напрацювання між відмовами

NAT – Network Address Translation – трансляція мережевих адрес

NFF – No Fault Found – несправність не виявлено

NI – National Instruments – компанія-виробник вимірювального обладнання

OCF – Open-Circuit Fault – несправність типу обрив кола

OPC-UA – Open Platform Communications Unified Architecture – уніфікована

архітектура відкритих платформних комунікацій

PCB – Printed Circuit Board – друкована плата

PCE – Polynomial Chaos Expansion – розширення поліноміального хаосу

PHM – Prognostics and Health Management – прогностичне обслуговування та управління станом

PINN – Physics-Informed Neural Network – фізично інформована нейронна мережа

PLM – Product Lifecycle Management – управління життєвим циклом виробу

PSO – Particle Swarm Optimization – оптимізація роєм частинок

PWM – Pulse Width Modulation – широтно-імпульсна модуляція (ШИМ)

PXI – PCI eXtensions for Instrumentation – стандарт промислових вимірювальних приладів

REST – Representational State Transfer – архітектурний стиль веб-сервісів

RLMS – Remote Laboratory Management System – система управління дистанційними лабораторіями

RMS – Root Mean Square – середньоквадратичне значення

RUL – Remaining Useful Life – залишковий ресурс

SCF – Short-Circuit Fault – несправність типу коротке замикання

SEPIC – Single-Ended Primary-Inductor Converter – однотактний перетворювач з первинним індуктором

SiC – Silicon Carbide – карбід кремнію

SIL – Software-in-the-Loop – програмне моделювання в контурі

SPI – Serial Peripheral Interface – послідовний периферійний інтерфейс

SPICE – Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis – програма моделювання інтегральних схем

SSA – State-Space Averaging – усереднення у просторі станів

TCP/IP – Transmission Control Protocol / Internet Protocol – протокол керування передачею / інтернет-протокол

TDR – Time-Domain Reflectometry – рефлектометрія в часовій області

UART – Universal Asynchronous Receiver-Transmitter – універсальний

асинхронний приймач-передавач

USB – Universal Serial Bus – універсальна послідовна шина

VAE – Variational Autoencoder – варіаційний автоенкодер

VISIR – Virtual Instrument Systems in Reality – система віртуальних приладів у реальності

WebRTC – Web Real-Time Communication – технологія веб-комунікації в реальному часі

YAML – YAML Ain't Markup Language – формат серіалізації даних

ZVS – Zero Voltage Switching – комутація при нульовій напрузі

КЗ – коротке замикання

ККД – коефіцієнт корисної дії

ШІ – штучний інтелект

ВСТУП

Актуальність теми. В сучасному світі спостерігається тенденція до зростання складності електронного обладнання, що використовується у важливих сферах, таких як телекомунікації, відновлювана енергетика, транспортні системи, аерокосмічна галузь тощо. В основі таких систем лежать пристрої силової електроніки, такі як напівпровідникові перетворювачі електроенергії, зокрема перетворювачі постійного струму, які забезпечують перетворення та стабілізацію електричної енергії. Відмова таких пристроїв може призводити до каскадних збоїв, значних економічних втрат та загроз безпеці, тому завдання своєчасної та точної діагностики несправностей є одним із пріоритетних напрямків сучасної інженерії.

Традиційні методи діагностики електронного обладнання, що базуються на періодичних вимірюваннях, візуальному контролі або статистичному аналізі напрацювань, мають суттєві обмеження. Вони, як правило, виявляють несправності лише після їх виникнення, не здатні ідентифікувати поступову деградацію параметрів компонентів і вимагають фізичного доступу до кожного елемента схеми для здійснення вимірювань та локалізації причини відмови. В умовах зростання щільності монтажу, зменшення розміру компонентів та підвищення частот комутації ці підходи стають дедалі менш ефективними, оскільки паразитні параметри (такі, як еквівалентний послідовний опір конденсаторів, опір каналу транзистора чи паразитна індуктивність) суттєво впливають на поведінку схеми, проте не можуть бути безпосередньо виміряні в процесі експлуатації.

У відповідь на ці виклики перспективним напрямком є впровадження інформаційної технології цифрового двійника, який є комп'ютерною моделлю фізичного пристрою, що відтворює його поведінку з достатньою точністю для порівняння з реальними вимірюваннями. Використання цифрового двійника як еталонної моделі дозволяє реалізувати інший підхід до діагностики: замість прямого вимірювання кожного компонента всередині реального пристрою, система порівнює його (пристрою) вихідні сигнали з очікуваними значеннями моделі та на основі характеру відхилень визначає як наявність несправності, так і ймовірну її причину.

Однак аналіз сучасного стану у цій галузі виявляє низку невирішених науково-технічних проблем.

По-перше, точність цифрового двійника залежить від коректності ідентифікації паразитних параметрів схеми, які не наводяться у документації компонентів і визначаються як окремими електронними компонентами, так і конструкцією друкованої плати. Як результат, задача ідентифікації зводиться до складної багатовимірної нелінійної оптимізації з численними локальними екстремумами, що вимагає застосування спеціалізованих метаввристичних алгоритмів. По-друге, існує потреба в методах, які б системно описували процес діагностики напівпровідникових перетворювачів постійного струму від побудови моделі до ухвалення рішення про причину несправності, за якого обчислювально витратні операції (ідентифікація параметрів моделі та формування діагностичних правил) виконуються одноразово на етапі ініціалізації, а онлайн фаза діагностики зберігає обчислювальну простоту, достатню для реалізації у вбудованих системах. По-третє, станом на зараз відсутні уніфіковані підходи до верифікації діагностичних систем на реальному обладнанні. Задля цього можуть використовуватися інформаційні технології дистанційних лабораторій, проте в науковій літературі відсутній уніфікований метод об'єктивного (кількісного) порівняння технологій їх побудови, що ускладнює процес вибору конкретної технології. Окремим невирішеним питанням є вибір еталонного вимірювання, за яким виконується калібрування: за довільного вибору цільового сигналу відхилення відкаліброваної моделі від експериментальної вибірки виявляються асиметричними, що унеможлиблює їх безпосереднє використання як порогів діагностування.

Таким чином, розробка нових методів та інформаційних технологій, які б забезпечували точну ідентифікацію параметрів моделі силового напівпровідникового перетворювача, формалізовану діагностику його несправностей на основі цифрового двійника та обґрунтований вибір технологічної платформи для її верифікації, є актуальним науковим завданням, що має важливе теоретичне і практичне значення для підвищення надійності експлуатації електронного обладнання.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Дисертація

була виконана в Національному університеті «Чернігівська політехніка» за пріоритетними напрямками розвитку науки і техніки України «Інформаційні та комунікаційні технології» та «Енергетика та енергоефективність» та в рамках реалізації наукових проєктів:

- «Lab Discovery Engine» – міжнаціональний суб-грант проєкту NGI Search від програми Horizon Europe HORIZON-CL4-2021-HUMAN-01, номер проєкту: 101069364;
- «DIGITRANS. Цифрова трансформація освітнього процесу ЗВО в Україні та Молдові для сталого співробітництва з підприємствами» в рамках програми ERASMUS+ «Розвиток потенціалу вищої освіти» (ідентифікатор проєкту: 01127683-DIGITRANS-ERASMUS-EDU-2023-CBHE);
- «Методи і моделі динамічної бездротової передачі енергії на основі гібридного зв'язку» (державний реєстраційний номер: 0126U001717, прикладне наукове дослідження, що фінансується МОН України).

Метою дослідження є підвищення ефективності онлайн-виявлення та ідентифікації відмов напівпровідникових перетворювачів електроенергії шляхом розроблення нових методів та інформаційної технології діагностування на основі цифрових двійників.

Ефективність онлайн-виявлення та ідентифікації відмов характеризується частковими показниками (повнотою та своєчасністю виявлення несправності, точністю і часом локалізації її причини та рівнем хибних спрацювань) та оцінюється інтегрально за їх впливом на коефіцієнт готовності перетворювача відносно системи без онлайн-діагностування.

Для досягнення поставленої мети дисертаційного дослідження необхідно розв'язати такі наукові завдання:

1. Провести аналіз сучасних підходів до діагностики пристроїв силової електроніки, методів побудови цифрових двійників електронних систем, методів оптимізації параметрів моделей електронного обладнання та технологій дистанційних лабораторій.
2. Розробити метод калібрування цифрового двійника перетворювача

постійного струму на основі генетичного алгоритму для підвищення його точності.

3. Розробити метод онлайн-діагностування напівпровідникових перетворювачів електроенергії на основі відкаліброваного цифрового двійника, який забезпечує виявлення та локалізацію причин відмов.
4. Розробити метод порівняння інформаційних технологій побудови дистанційних лабораторій для обґрунтованого вибору технологічної платформи верифікації діагностичної системи напівпровідникових перетворювачів електроенергії.
5. Розробити метод порівняння технологій для інтеграції з обраною інформаційною технологією побудови дистанційних лабораторій для зваженого вибору технології реалізації діагностичної системи.
6. Провести експериментальну валідацію запропонованих методів на реальному перетворювачі постійного струму з використанням інформаційної технології дистанційних лабораторій.
7. Оцінити ефективність розроблених методів за інтегральним експлуатаційним показником (коефіцієнтом готовності) шляхом побудови моделі готовності напівпровідникового перетворювача електроенергії і кількісного визначення цього показника.

Об'єктом дослідження є інформаційні процеси обробки та аналізу інформації в комп'ютерних системах діагностування електронних пристроїв.

Предметом дослідження є моделі, методи та інформаційна технологія діагностування відмов напівпровідникових перетворювачів електроенергії на основі цифрових двійників.

Методи дослідження. У роботі для досягнення мети використано комплекс методів дослідження, що відповідають науково-технічним задачам комп'ютерних наук та дозволяють досягти мети дослідження:

- математичне та комп'ютерне моделювання для створення точних математичних моделей електронних схем з урахуванням паразитних параметрів;

- метаевристична оптимізація для розв’язання задачі глобальної мінімізації при калібруванні математичної моделі під конкретний екземпляр пристрою за еталонним сигналом;
- методи системного аналізу та векторної алгебри для розроблення методу векторної діагностики, що базується на порівнянні нормалізованих вихідних векторів реального пристрою та моделі;
- методи прийняття рішень та експертного оцінювання при розробленні методу порівняння технологій дистанційних лабораторій на основі вагових коефіцієнтів та системи критеріїв;
- сучасні технології вебпрограмування для розроблення та імплементації архітектури дистанційної лабораторії LabDiscoveryEngine;
- експериментальні методи для верифікації розроблених методів на реальному обладнанні силової електроніки;
- методи теорії надійності та теорії марковських випадкових процесів.

Наукова новизна одержаних результатів. На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень у дисертаційній роботі розв’язано важливу науково-прикладну задачу підвищення ефективності онлайн-виявлення та ідентифікації відмов напівпровідникових перетворювачів електроенергії з використанням цифрових двійників. У межах виконаного дослідження отримано такі нові наукові результати:

1. Вперше запропоновано інтегрований метод онлайн-діагностування напівпровідникових перетворювачів електроенергії на основі цифрового двійника, який, на відміну від існуючих, поєднує калібрування цифрового двійника під конкретний екземпляр пристрою, векторне порівняння зовнішніх сигналів працюючого перетворювача з еталонними даними двійника та таблицю відповідності між векторною різницею і ступенем несправності/деградації елементів перетворювача, що дозволяє локалізувати причину відмови без вимірювань параметрів окремих елементів.
2. Отримали подальший розвиток методи калібрування цифрових двійників

перетворювачів постійного струму на основі генетичних алгоритмів, які, на відміну від існуючих, визначають еталонний сигнал для калібрування за критерієм рівновіддаленості його показників від граничних значень експериментальної вибірки, що дало змогу узгодити цифровий двійник із конкретним екземпляром фізичного об'єкта та безпосередньо використати симетричні відхилення відкаліброваної моделі від експериментальних даних як початкові пороги діагностування.

3. Отримали подальший розвиток технологічні підходи до формування архітектури дистанційних інженерних лабораторій шляхом розроблення методу багатокритеріального порівняльного аналізу за системою зважених критеріїв, зокрема можливості інтеграції, швидкодії та простоти конфігурації. Це створює підґрунтя для науково аргументованого вибору архітектури інформаційних систем, орієнтованих на роботу з цифровими двійниками електронного обладнання.

Практичне значення одержаних результатів. Отримані наукові результати утворюють нову інформаційну технологію діагностування відмов у напівпровідникових перетворювачах електроенергії на основі цифрових двійників, яка комплексно забезпечує калібрування еталонної моделі під конкретний екземпляр пристрою за метаввристично ідентифікованими паразитними параметрами з автоматичним формуванням початкових порогів діагностування, автоматизоване неінвазивне виявлення та локалізацію параметричних несправностей компонентів шляхом аналізу відхилень вихідних сигналів, а також обґрунтований багатокритеріальний вибір технологічних платформ дистанційних лабораторій та їхнього бекенду для експериментальної валідації. Запропонована інформаційна технологія може бути використана для побудови систем автоматизованої діагностики та проактивного (а в перспективі – предиктивного) технічного обслуговування пристроїв силової електроніки без потреби прямого фізичного доступу до їхніх внутрішніх елементів. Розроблені методи, алгоритми та програмно-апаратні засоби також можуть стати основою для створення комплексних діагностичних систем складного кіберфізичного обладнання та базової архітектури віддалених лабораторій

електронного спрямування.

Результати дисертаційного дослідження впроваджені:

- В рамках реалізації міжнародного наукового проєкту «Lab Discovery Engine» – суб-гранту проєкту NGI Search від програми Horizon Europe HORIZON-CL4-2021-HUMAN-01, номер проєкту: 101069364 (Додаток А);
- В рамках реалізації міжнародного наукового проєкту «Цифрова трансформація освітнього процесу ЗВО в Україні та Молдові для сталого співробітництва з підприємствами» в рамках програми ERASMUS+ «Розвиток потенціалу вищої освіти», ідентифікатор проєкту: 01127683-DIGITTRANS-ERASMUS-EDU-2023-CBHE (Додаток А).
- У навчальному процесі НУ «Чернігівська політехніка» при проведенні лекцій та лабораторних робіт з дисциплін «Мікропроцесорні системи» та «Джерела живлення телекомунікаційного обладнання» в процесі навчання бакалаврів спеціальності 172 – «Електронні комунікації та радіотехніка» (Додаток А)

Особистий внесок здобувача. Усі наукові результати, викладені в дисертаційній роботі і які виносяться до захисту, отримані автором самостійно. В наукових роботах, опублікованих у співавторстві, в дисертації використані лише ті ідеї та положення, що є результатом особистої роботи автора.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на науково-технічних конференціях і семінарах, зокрема:

1. Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих учених «Новітні технології у науковій діяльності і навчальному процесі» (м.Чернігів, Україна, 19-20 квітня 2023 р.)
2. V International Scientific and Practical Conference «Theoretical and Applied Aspects of Device Development on Microcontrollers and FPGAs» MC&FPGA-2023 (Kharkiv, Ukraine, June 22-23, 2023)
3. V Міжнародна науково-практична конференція «Новітні технології сучасного суспільства НТСС-2024» (м. Чернігів, Україна, 12 грудня 2024

p.)

4. XIV Міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів і молодих вчених «ЮНІСТЬ НАУКИ – 2024» (м.Чернігів, Україна, 24-26 квітня 2024 р.)
5. 2025 IEEE 35th Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)

Публікації. Основні положення та результати дисертаційного дослідження відображено у 11 наукових працях, із них 5 статей у фахових наукових виданнях України з технічних наук категорії «Б», а 1 включена до міжнародної наукометричної бази Scopus; 5 публікацій у збірниках матеріалів наукових конференцій різного рівня, 1 з яких включена до міжнародної наукометричної бази Scopus.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів з висновками, висновків, переліку умовних позначень, переліку посилань з 156 джерел та 6 додатків. Загальний обсяг роботи становить 234 сторінок, з яких зміст на 3 сторінках, вступ на 8 сторінках, перелік умовних позначень на 4 сторінках, основний текст на 169 сторінках, список використаних джерел з 156 найменувань на 20 сторінках, 6 додатків на 26 сторінках. Робота містить 39 рисунків (також 3 у додатках) та 18 таблиць (також 25 у додатках).

Декларація про використання ШІ. Під час підготовки роботи автор використовував Claude Opus для пошуку літературних джерел з відкритим доступом, написання коду мовою програмування Python для генерації графіків з наявних даних, а також формування переліку умовних позначень. Після застосування цих інструментів автором було проведено ретельний перегляд результатів та внесення необхідних змін, беручи на себе повну відповідальність за остаточний зміст дисертаційної роботи.

РОЗДІЛ 1. Оглядовий розділ

1.1 Сучасні підходи до діагностики електронного обладнання

Сучасне промислове та електронне обладнання являє собою складні технічні системи, що містять від десятків до тисяч взаємопов'язаних компонентів: напівпровідникових елементів, пасивних компонентів, механічних вузлів, сенсорів та модулів зв'язку. Функціонування такої системи як єдиного цілого забезпечується злагодженою роботою кожного з цих елементів. Водночас збільшення кількості компонентів закономірно призводить до зниження загальної надійності системи.

Відповідно до основних положень теорії надійності, для системи, що складається з n компонентів, з'єднаних послідовно за надійністю, функція надійності визначається як:

$$R_s(t) = \prod R_i(t) = \prod e^{-\lambda_i \cdot t} = e^{-(\lambda \Sigma \cdot t)} \quad (1.1)$$

де $R_i(t)$ – функція надійності i -го компонента, λ_i – його інтенсивність відмов, $\lambda \Sigma = \Sigma \lambda_i$ – сумарна інтенсивність відмов системи.

Середній час напрацювання до першої відмови (MTTF) системи при цьому становить:

$$\text{MTTF} = \frac{1}{\lambda \Sigma} = \frac{1}{\Sigma \lambda_i}. \quad (1.2)$$

З наведених виразів випливає принциповий висновок: зі зростанням кількості компонентів сумарна інтенсивність відмов системи збільшується, а її надійність – знижується. Так, навіть якщо кожен з 1000 компонентів має надійність $R = 0.999$ протягом заданого інтервалу часу, надійність системи в цілому складатиме лише $R_s \approx 0.368$.

Вихід обладнання з ладу спричиняє суттєві економічні та операційні наслідки. За оцінками експертів ще в 2020 році, неефективні стратегії технічного обслуговування призводять до втрати від 5% до 20% виробничої потужності, а незаплановані простої коштують промисловим виробникам понад 647 мільярдів доларів щорічно по всьому світу [1]. Діагностика електронних пристроїв є важливою складовою забезпечення надійності електронних систем, оскільки своєчасне

виявлення несправностей дозволяє запобігти катастрофічним відмовам та мінімізувати економічні втрати від незапланованих простоїв.

У критичних застосуваннях, таких як системи електропостачання, медичне обладнання, засоби автоматизації, наслідки несправностей виходять далеко за межі фінансових втрат та можуть становити загрозу для безпеки людського життя. Тому першочерговим завданням є не лише усунення несправностей після їх виникнення, але й завчасне виявлення ознак деградації компонентів до настання катастрофічної відмови. Такий підхід отримав назву предиктивного технічного обслуговування (Predictive Maintenance).

Для реалізації функцій діагностики та моніторингу стану обладнання в сучасній практиці застосовуються такі класи підходів:

- традиційні методи тестування (вбудоване самотестування, ланцюгове тестування, внутрішньосхемне тестування);
- методи на основі сигнатурного аналізу та обробки сигналів;
- методи на основі машинного навчання та нейронних мереж;
- методи на основі фізичних та математичних моделей, зокрема цифрових двійників.

Незалежно від обраного підходу, основою будь-якої системи діагностики є вимірювальні сенсори. Вони перетворюють фізичні величини (електричні та неелектричні) у сигнали, придатні для подальшої цифрової обробки. Для обладнання силової електроніки типовими вимірюваними параметрами є напруга, струм, температура компонентів, а також часові форми сигналів. Система збору та обробки цих сигналів у сукупності з діагностичним алгоритмом утворює замкнений контур оцінки стану обладнання, узагальнена структура якого наведена на рисунку 1.1.

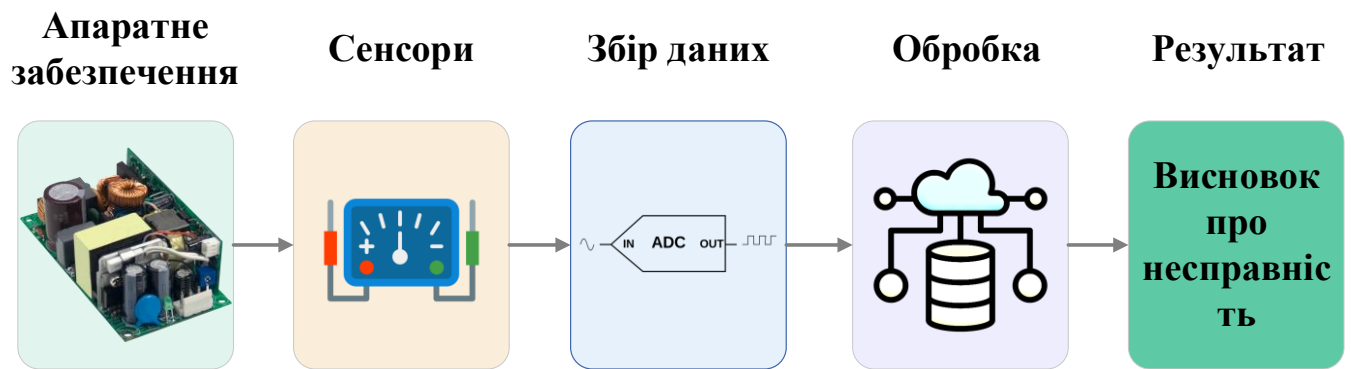


Рис. 1.1. Узагальнена структура системи оцінки стану обладнання

Для систем силовій електроніки, зокрема перетворювачів постійного струму, точна інтерпретація відхилень вимірюваних параметрів від еталонних значень дозволяє ідентифікувати несправні компоненти та оцінити ступінь їх деградації. Розробка ефективних методів такої інтерпретації потребує глибокого розуміння наявних підходів, їхніх переваг і обмежень. З огляду на це, у розділі 1 проводиться систематичний аналіз сучасного стану методів діагностики електронних пристроїв (підрозділ 1.1), технологій цифрових двійників як інструменту діагностики (підрозділ 1.2) та дистанційних лабораторій як засобу взаємодії з обладнанням (підрозділ 1.3). За результатами аналізу формулюються невирішені наукові проблеми та обґрунтовуються напрямки дисертаційного дослідження.

Для побудови адекватної математичної моделі цифрового двійника, здатної ідентифікувати аномалії в роботі обладнання, першочерговим завданням є класифікація критичних дефектів. Нижче наведено аналіз основних типів несправностей, які виникають у вузлах силовій перетворювальної техніки в процесі експлуатації.

1.1.1 Основні типи несправностей в силовій електроніці

У силових перетворювачах надійність залежить від окремих компонентів. Найслабшою ланкою є силові ключі, які є найбільш вразливими до поломок. Пасивні компоненти (конденсатори, резистори), в свою чергу, піддаються фізичному старінню, що поступово погіршує їх роботу.

Найтиповішими відмовами **силових ключів** (MOSFET/IGBT) у перетворювачах є коротке замикання (short-circuit) та обрив кола (open-circuit). Їх

часто розглядають як базові «функціональні моделі» відмов у діагностиці. Коротке замикання зазвичай відносять до критичних сценаріїв, оскільки воно може спричинити катастрофічний розвиток подій (струм через плече інвертора/ключі, пробій, тепловий розгін), і тому вимагає швидкого реагування для захисту схеми. При обривах перетворювач «втрачає» один зі станів. Наприклад, в підвищуючому перетворювачі, при пасивному навантаженні, обрив основного ключа призводить до встановлення на виході напруги, приблизно рівній вхідній, що не є миттєво катастрофічним (хоча і, вочевидь, робить пристрій непрацюючим), але може призвести до вторинних пошкоджень, якщо буде непоміченим. [2, 3]

Для **вихідних конденсаторів** найбільш типовим є старіння електролітичних конденсаторів переважно через висушення електроліту. Зі зниженням об'єму електроліту всередині конденсатора, еквівалентний послідовний опір (ESR) збільшується, а ємність знижується. Виробники визначають кінець терміну експлуатації як зниження ємності на 20%, а збільшення ESR на 280-300% [4] відносно початкових значень (хоча відсоткове значення ESR є спірним, і суттєво відрізняється в різних джерелах). Спостережуваний вплив на вихідні параметри перетворювача є очевидним. Збільшення ESR безпосередньо призводить до зростання пульсацій вихідної напруги часто у 2-3 рази до закінчення терміну експлуатації. Крім того, конденсатори також схильні до відмов типу коротке замикання та обрив. На відміну від поступової деградації електроліту, ці типи відмов є жорсткими, а отже вимагають невідкладних дій. [4, 5]

Відокремлення зв'язувального дроту та втома пайки є відмовами на рівні «корпусу» або «монтажу». Відокремлення зв'язувального дроту виникає внаслідок розбіжності коефіцієнтів теплового розширення між алюмінієвими з'єднувальними дротами та кремнієвими мікросхемами. Під час циклів увімкнення/вимкнення з коливаннями температури в діапазоні 60-120 °C циклічне навантаження викликає утворення мікротріщин біля основи дроту, які поширюються аж до повного відриву. При цьому, існує небезпечний зворотний зв'язок: коли дроти відриваються, струм перерозподіляється на решту дротів, збільшуючи їхнє локальне нагрівання та прискорюючи вже їх деградацію.

Несправності драйвера затвора можуть призводити до критичних наслідків. Одним з найбільш серйозних є ситуація, коли обидва ключі в топології half-bridge проводять струм одночасно, що призводить фактично до стану короткого замикання схеми на певні (хоч можливо і короткі) проміжки часу, що суттєво збільшує струм, що проходить через компоненти схеми, призводячи до їх нагрівання та виходу з ладу. Ці несправності можуть бути викликані помилкою в алгоритмі керування, періодичних пропусках спрацьовування (спричинених електромагнітними перешкодами), пробоями оксидного шару затвора тощо.

Параметричний дрейф **катушки індуктивності** призводить до збільшення пульсацій струму. Найнебезпечнішим наслідком є насичення сердечника, викликаний зменшення порогу насичення в результаті деградації катушки, що призводить до майже миттєвих стрибків струму, здатних вивести з ладу реле та діоди. Збільшення опору обмотки призводить до зростання втрат на провідність і створює петлю позитивного теплового зворотного зв'язку. Збільшення опору обмотки безпосередньо знижує ККД через втрати на основі I^2R . [6]

Несправності **сенсорів**, таких як сенсорів напруги, струму чи обох, належать до одного з чотирьох типів: обрив (повна відмова), відхилення коефіцієнту підсилення (дрейф), зсув значення та аномалії шуму [7]. Найбільш розповсюдженими причинами є старіння датчиків Холла, дрейф дільників опору, електромагнітні перешкоди, механічні пошкодження та механічне зношення роз'ємів. Особлива небезпека несправностей датчиків у перетворювачах постійного струму полягає в тому, що контролер використовує недостовірні вимірювання для розрахунку коригувальних дій, що може погіршити фактичний робочий стан через позитивний зворотний зв'язок. Стандарт ISO 26262 класифікує несправності датчиків як випадкові апаратні несправності, що вимагають виявлення та усунення для забезпечення функціональної безпеки [8].

Термоциклування це не окремий тип несправності, а механізм, що лежить в основі відокремлення з'єднувальних дрітків, втоми пайки та погіршення якості оксиду затвора. Через те, що теплове навантаження є взаємозалежним з іншими механізмами руйнування електронного обладнання, всі вони разом призводять до сукупного

прискорення руйнування. Температурні ефекти є причиною приблизно 55% всіх відмов в силовій електроніці [4].

Таблиця 1.1

Відмови в силовій електроніці

Тип	Рівень серйозності	Швидкість настання відмови	Швидкість розвитку катастрофічних наслідків
Коротке замикання ключа	4	Миттєво	Миттєво
Коротке замикання конденсатора	4	Миттєво	Миттєво
Несправності драйвера затвора	4	Миттєво	Миттєво
Обрив ключа	3	Миттєво	Секунди-хвилини (вторинні пошкодження, не миттєва катастрофа)
Несправність сенсорів (повна відмова)	3	Мілісекунди-секунди	Секунди-хвилини
Несправність сенсорів (дрейф)	2	Години-дні	Години-дні (але може прискоритись через зворотний зв'язок)
Відокремлення зв'язувального дроту	2	10^4 - 10^6 термоциклів	Миттєво після фінального відриву (перерозподіл струму)
Втома пайки	2	10^4 - 10^6 термоциклів	Миттєво при фінальному розриві
Деградація конденсатора	1	Місяці-роки	Місяці-роки (якщо не переходить у КЗ/обрив)
Дрейф котушки	1	Місяці-роки	Миттєво (при досягненні

індуктивності			порогу насичення)
---------------	--	--	-------------------

В таблиці 1.1 зображені наступні рівні серйозності:

- Рівень 1 (Незначний) – відмова призводить до незначних відхилень у робочих параметрах, які не впливають на виконання основної функції пристрою. Він (пристрій) залишається повністю працездатним, а дефекти (наприклад, незначна зміна паразитних параметрів) зазвичай виявляються лише під час глибокого моніторингу.
- Рівень 2 (Суттєвий) – відмова спричиняє деградацію характеристик або зниження ефективності роботи (наприклад, зростання рівня пульсацій або втрат енергії) пристрою. Він продовжує функціонувати, але його ефективність знижується. Крім того, підвищується теплове навантаження на компоненти, через що з'являється необхідність планування технічного обслуговування.
- Рівень 3 (Критичний) – відмова призводить до повної втрати функціональності системи або виходу параметрів за межі допустимих експлуатаційних норм. Подальша робота пристрою стає неможливою без заміни компонентів. Заміна стає необхідною, оскільки подальша робота в такому режимі може призвести до переходу відмови у категорію катастрофічних (рівень 4).
- Рівень 4 (Катастрофічний) – характеризується миттєвим руйнуванням ключових силових елементів (наприклад, внаслідок короткого замикання ключа або конденсатора). Наслідки розвиваються настільки швидко, що стандартні алгоритми керування системою не встигають реагувати, що створює ризик безповоротної втрати всього обладнання. Також катастрофічні відмови можуть призводити до руйнування інших пристроїв, підключених до даного.

1.1.2 Традиційні методи діагностики та їх обмеження

Традиційні підходи до діагностики електронних пристроїв можна розділити на дві основні групи: функціональне тестування та структурне тестування.

Функціональне тестування ґрунтується на принципі «чорної скриньки». Система перевіряється шляхом подачі вхідних сигналів та порівняння отриманих результатів з очікуваними реакціями. Недоліком є те, що воно має обмеження у виявленні несправностей, які проявляються лише при специфічних умовах експлуатації [9].

Структурне тестування, на відміну від функціонального, використовує інформацію про внутрішню архітектуру схеми для генерації тестових послідовностей на основі моделей несправностей [10], але потребує додаткового апаратного забезпечення (сканувальні ланцюги, контрольні точки тощо), що призводить до відносно високої вартості реалізації. Крім того, алгоритми, розроблені для конкретних топологій, неможливо використати для інших типів пристроїв.

Модельно-орієнтовані підходи демонструють кращу точність, але потребують детальних знань про систему. Вони базуються на рівняннях паритету, генерації сигналів неузгодженості (residuals) через оцінку параметрів або моделей-спостерігачів стану (observers) [11]. Це ускладнює їх застосування при зміні конфігурації системи та вимагає значних обчислювальних ресурсів.

Основною проблемою традиційних методів є їх фокус на виявленні саме катастрофічних відмов (короткі замикання, обриви), замість виявлення поступової деградації компонентів.

Вбудоване самотестування (Built-In Self-Test, BIST) полягає в інтеграції додаткових апаратних модулів безпосередньо в конструкцію мікросхем. Даний підхід дозволяє проведення тестування безпосередньо під час експлуатації (без зупинки системи). Водночас, BIST є стратегією обробки несправностей лише на рівні виявлення, при якій система сигналізує про факт виявлення несправності, але не діє на неї і залишає реагування зовнішньому середовищу [12]. Це означає, що BIST надає бінарну інформацію «справний/несправний» без можливості точного визначення до конкретного компонента. Крім того, BIST не здатний виявляти параметричний дрейф та м'які відмови.

JTAG/Boundary Scan (IEEE 1149.1) є стандартизованим інтерфейсом для структурного тестування друкованих плат. Метод полягає в інтеграції граничних

комірок (boundary scan cells) між ядром пристрою та зовнішніми виводами, об'єднаних у послідовний ланцюг для зсуву даних через інтерфейс, який складається з п'яти сигналів: TDI, TDO, TMS, TCK, TRST. JTAG ефективно тестує з'єднання без фізичних зондів, забезпечує доступ до прихованих виводів під BGA-корпусами (що робить технологію особливо цінною для компонентів у таких корпусах) та підтримує внутрішньосистемне програмування. Даний метод працює на основі виявлення дефектів цифрових (логічних) з'єднань, через що він не здатний аналізувати поведінку аналогових сигналів або параметричні відхилення компонентів, бо такий бінарний результат тестування «успіх»/«відмова» не містить інформації про аналогові величини, такі як опори, ємності тощо. Тому для діагностики силової електроніки, особливо м'яких відмов, JTAG має мінімальну користь.

Внутрішньосхемне тестування (In-Circuit Testing, ICT) застосовує підхід «bed-of-nails» з випробовувальним стендом, який має велику кількість підпружинених щупів для контактування з тестовими точками друкованої плати та електричної ізоляції окремих компонентів для вимірювання їх параметрів. ICT вимірює опір, ємність, індуктивність у конкретних вузлах та верифікує наявність, номінал і орієнтацію компонентів. Серед усіх традиційних методів ICT забезпечує найвищий рівень покомпонентної діагностики під час виробництва. Проте цей підхід має суттєве обмеження: доступ до тестових точок стає дедалі складнішим із зменшенням розмірів плат. Сучасні високощільні друковані плати із BGA-компонентами та дрібним кроком виводів часто роблять фізичний доступ неможливим. Крім того, ICT виконується на знеструмлених або частково живлених платах, що робить неможливим тестування пристроїв в режимі реального часу та під час експлуатації, а використовується лише на етапі виробництва. [13, 14]

Функціональне тестування (FCT) перевіряє систему шляхом подачі живлення, генерації стимулюючих сигналів та порівняння вихідних параметрів із очікуваними. Метод здатний виявляти дефекти, які можуть пропустити інші традиційні підходи (компоненти зі значеннями поза допуском, термічні ефекти), а також валідує взаємодію апаратного та програмного забезпечень. Водночас даний метод характеризується низькою здатністю до ізоляції конкретних причин

несправностей. На відміну від структурного тесту, системне тестування не має добре розроблених моделей несправностей. FCT надає бінарний результат без локалізації проблемного компонента.

Обмеження традиційних методів.

По-перше, відсутність покомпонентної діагностики під час експлуатації: хоча ІСТ забезпечує точну ідентифікацію конкретних компонентів та вимірювання їх параметрів, це можливе лише на знеструмлених або частково живлених платах на етапі виробництва/тестування, тоді як BIST, JTAG та FCT діагностують виключно на рівні підсистеми («блок несправний»/«блок справний») без визначення конкретного компонента. Для силової електроніки це особливо критично, оскільки поведінка компонентів під реальним навантаженням та в динамічних режимах роботи може суттєво відрізнятися від статичних вимірювань ІСТ.

По-друге, більшість методів реального часу (BIST, JTAG) мають бінарний характер результатів («успіх»/«відмова») без градації ступеня несправності, тоді як FCT, хоча й може вимірювати градації параметрів, не забезпечує їх кількісного зв'язку з конкретними компонентами. ІСТ, хоча й вимірює фактичні значення (без локалізації), але робить це лише на етапі виробництва.

По-третє, традиційні підходи використовують статичні моделі несправностей (stuck-at, структурні дефекти), що не підходять для сучасних параметричних варіацій та м'яких відмов.

По-четверте, паразитні параметри недостатньо враховуються у стандартних моделях несправностей, хоча існують спеціалізовані методи для їх оцінки (TDR, векторний аналіз ланцюгів). ІСТ хоча й вимірює компоненти на друкованій платі, але використовує низькочастотні сигнали або сигнали постійного струму, через що не дозволяє виявити поведінку паразитних ємностей та індуктивностей, які проявляються в динамічних режимах роботи силової електроніки при використанні більш високих частот комутації. До того ж, паразитні компоненти можуть інакше себе проявляти під навантаженням.

По-п'яте, масштабованість методів обмежена зростаючою складністю та постійним зменшенням у розмірах реальних друкованих плат, бо сучасні

високощільні друковані плати з BGA-компонентами та дрібним кроком виводів часто роблять фізичний доступ для ICT неможливим, що особливо критично для силовій електроніки, де компоненти часто розташовані під радіаторами або в недоступних зонах.

1.1.3 Еволюція методів діагностики в контексті Industry 4.0

Четверта промислова революція (Industry 4.0) принесла фундаментальні зміни у підходах до діагностики електронних пристроїв. Інтеграція IoT, штучного інтелекту та цифрових технологій створила нові можливості для моніторингу стану обладнання [15]. У цьому контексті особливої важливості набули системи прогностичного обслуговування та управління станом (Prognostics and Health Management, PHM).

Системи прогностичного обслуговування та управління станом забезпечують перехід від реактивного до проактивного обслуговування, що дозволяє виявляти потенційні проблеми до настання катастрофічних відмов і відреагувати завчасно. Впровадження проактивного обслуговування забезпечує зниження простоїв, зменшення витрат на технічне обслуговування та подовження терміну служби обладнання [16]. Це відбувається за рахунок того, що системи PHM фокусуються не лише на ідентифікації несправностей, а й на прогнозуванні залишкового ресурсу (Remaining Useful Life, RUL), що дозволяє оптимально планувати технічне обслуговування. PHM забезпечує раннє попередження про несправності, збільшення міжремонтних інтервалів, зниження витрат життєвого циклу та зменшення випадків «несправності не виявлено» (No Fault Found, NFF). Хоча PHM теоретично включає компонентну діагностику, більшість практичних реалізацій фокусуються на моніторингу стану підсистем або окремих великих компонентів (двигун, редуктор, конденсаторний блок) як цілого, без глибокої ізоляції до конкретних елементів всередині цих компонентів (C_1 чи C_2 , R_3 чи R_4). Особливого значення це має в контексті силовій електроніки, де важливо визначати причини відмови на рівні конкретного «саме C_3 із п'яти конденсаторів у схемі має ESR більше потрібного», а не просто «якась ємність деградує».

Апаратно-орієнтована діагностика.

Апаратно-орієнтована діагностика (Hardware-based) полягає в встановленні додаткових сенсорів всередині пристрою на кожен з компонентів, моніторинг стану яких потребується. Цей підхід є швидким та ефективним, але є дорогим через вимогу встановлення додаткового електронного обладнання, а також вимагає збільшення масогабаритних показників пристрою і ускладнює трасування друкованої плати. Іншими словами, такий підхід вводить апаратну надлишковість (hardware/physical redundancy). [5]

Модельно-орієнтована діагностика.

Модельно-орієнтована діагностика (Model-Based Fault Detection and Isolation, Model-Based FDI) базується на порівнянні поведінки реальної системи з математичною моделлю. В такому підході вводиться аналітична надлишковість (analytical redundancy) в тому сенсі, що замість додавання надлишкових сенсорів (hardware/physical redundancy), система, завдяки певним розрахункам моделі, прогнозує значення, виходячи з вхідних сигналів та поточного стану пристрою, які справжній сенсор, якби він існував, мав би показувати. Найбільш популярними підходами є ті, що ґрунтуються на нев'язках (сигналах невідповідності) та ті, що ґрунтуються на оцінці параметрів. В перших моделі оцінюють значення виходів пристрою, а алгоритми діагностики генерують сигнали невідповідності (residuals) між реальними та прогнозованими (отриманими з моделі) значеннями виходів. Аналіз даних сигналів і виявляє несправності. Другі ж полягають в тому, що моделі оцінюють внутрішні стани пристрою і при помітних різницях з очікуваними, детектується відмова. Більш детальні приклади методів модельно-орієнтованої діагностики наведені в підрозділі 1.1.6.

Ключовою перевагою таких підходів є фізична інтерпретованість результатів у порівнянні з підходами «чорної скриньки», а також низькі вимоги до даних [17]. Правильно відкалібрована модель може бути використана для різних наборів станів однаково добре.

Недоліком є те, що точність моделі безпосередньо визначає якість діагностики [5]. Зміни параметрів компонентів системи через старіння створюють розбіжність між моделлю та реальною системою. Також нелінійні ефекти силової електроніки, такі як

насичення індукторів, температурна залежність ESR тощо, важко моделювати точно. Кожна нова топологія електричного пристрою потребує розробки нової математичної моделі. [17, 18]

Діагностика на основі даних та машинного навчання. Методи машинного навчання стали частою складовою сучасних діагностичних систем. Систематичний огляд [19] показує суттєве зростання публікацій з використання глибокого навчання для діагностики та прогнозування з 2020 року. В тому числі використовуються і методи комп'ютерного зору для діагностики електронних пристроїв, які працюють на основі інфрачервоних термічних зображень шляхом виявлення дефектів у обладнанні за допомогою аналізу теплових карт. Іншим способом використання комп'ютерного зору є візуальний пошук тріщин. Конволюційні нейронні мережі (CNN) демонструють високу точність у виявленні несправностей, особливо при обробці сигналів та зображень.

Мережі довгої короткострокової пам'яті (LSTM) є спеціалізованою архітектурою рекурентних нейронних мереж для обробки послідовних даних з часовими залежностями. LSTM ідеально підходять для виявлення аномалій у даних моніторингу стану завдяки здатності захоплювати темпоральні залежності у часових рядах [20].

Гібридна архітектура CNN-LSTM демонструє найкращі результати для діагностики складних систем. В роботі [21] продемонстрували, що така архітектура досягає точності 99.06% (при сигналах без шумів) для діагностики складних систем, що перевершує показники окремих CNN (95.83%) або LSTM (98.41%) моделей.

Автоенкодери забезпечують виявлення аномалій без учителя (unsupervised learning), що є дуже корисним в умовах обмеженої кількості розмічених даних щодо відмов. Варіаційні автоенкодери (VAE) застосовуються для генерації синтетичних даних. [22]

Важливими обмеженнями методів навчання з учителем (CNN, LSTM, CNN-LSTM тощо) є потреба у великих розмічених наборах даних, дисбаланс класів через рідкісність критичних несправностей. Спільними обмеженнями для всіх підходів, оснований на даних, є проблема «чорної скриньки» (неможливість пояснити причини

рішень), повільніша швидкість обробки та погана генералізація на нові умови експлуатації. [23, 24]

Фізично інформовані нейронні мережі (Physics-Informed Neural Network, PINN) інтегрують фізичні закони (їх математичне представлення) безпосередньо у функцію втрат нейромережі. В такому випадку нейромережа штрафується не лише за розбіжність з даними, а й за порушення законів фізики, що знижує ризик «вивчення» неправильних паттернів. Це виражається у (1) кращій генералізації, оскільки модель «знає» фізику, то вона краще працює на нових даних, яких не було в навчальній вибірці; (2) стійкості до шумів, бо фізичні обмеження діють як фільтр, який відсікає аномальні коливання, які суперечать, наприклад, логіці фізики деградації компонентів; (3) ефективності даних, оскільки фізичні рівняння вже дають моделі певну апріорну інформацію [25, 26]. Хоча методи на основі PINN демонструють високу точність оцінки параметрів системи, вони обмежені у можливості одночасної ідентифікації множинних параметрів, одночасного розрізнення конкретного проблемного компонента серед кількох елементів через фундаментальну проблему груп невизначеності (ambiguity groups) та все ще мають проблему «чорної скриньки».

Висновки щодо сучасних підходів.

Еволюція від детерміністичних модельно-орієнтовних методів через підходи, що засновані на даних до гібридних систем на основі цифрових двійників. Однак жоден не вирішує комплексно проблему ідентифікації конкретного проблемного компонента з кількісною градацією ступеня відхилення.

Використання підходів, заснованих на даних, ускладнюються тим, що наразі силова електроніка не є галуззю, що має та вимагає великі обсяги даних на відміну від, наприклад, сфери комп'ютерного зору. А також дуже часто силова електроніка використовується у критичних застосуваннях, що вимагає майже нульового допуску непередбачуваних результатів алгоритму діагностики. Це робить менш доцільними підходи, що засновані на даних, і які страждають від проблеми «чорної скриньки». [27]

1.1.4 Діагностика силовій електроніки та вбудованих систем

Діагностика систем силовій електроніки є окремою, більш складною задачею у порівнянні з діагностикою електронних пристроїв загалом, що обумовлено особливостями перетворювачів електричної енергії. На відміну від логічних цифрових схем, де несправності зазвичай мають бінарний характер (певний вихід має значення логічного «0» замість очікуваної логічної «1» або навпаки), силові електронні схеми характеризуються безперервним простором параметрів, наявністю паразитних параметрів, нелінійною поведінкою та складними механізмами поступової деградації компонентів.

Основні типи несправностей в силовій електроніці включають обриви та короткі замикання ключів (OCF та SCF), деградацію конденсаторів (зростання ESR та зменшення ємності), збої датчиків струму та напруги, а також параметричні відхилення індуктивних елементів [28]. Особливо проблемними є поступові деградації параметрів компонентів («м'які відмови»). Деградація конденсаторів є одним з найпоширеніших механізмів відмов. Для алюмінієвих електролітичних конденсаторів кінець терміну служби (EOL) настає при зменшенні ємності на 20% або збільшенні ESR на 280-300%. Для плівкових конденсаторів критерієм кінця терміну служби є зменшення ємності на 2-5% [29]. Ці зміни відбуваються поступово під впливом температури та електричних навантажень. Більш детально про основні типи несправностей в силовій електроніці було сказано в підрозділі 1.1.1.

Роль паразитних параметрів у діагностиці.

Паразитні параметри мають великий вплив на поведінку силових схем, особливо на високих частотах комутації [30]. В роботі [30] продемонстровано, що при частотах комутації 150 кГц і вище та великих шпаруватостях сигналу ШІМ, ідеальні моделі дають похибку понад 20% порівняно з фактичними вимірюваннями поведінки реальних електронних пристроїв. Було продемонстровано, що паразитний опір індукторів у SEPIC-перетворювачах суттєво знижує коефіцієнт підсилення напруги відносно теоретичного значення, особливо при коефіцієнтах заповнення понад 90%, а ігнорування паразитних ефектів може призвести до хибних прогнозів щодо швидкомасштабних нестабільностей (fast-scale instabilities) [31]. В роботі [32]

встановили, що паразитні ємності SiC-приладів порушують досягнення м'якої комутації (Zero Voltage Switching, ZVS) в LLC-перетворювачах.

Важливим є той факт, що паразитні параметри також змінюються в процесі старіння компонентів: зростає ESR конденсаторів, зростає паразитна індуктивність дрових з'єднань, відбувається зміна ємностей затвору транзистора через старіння оксиду. Всі ці зміни є вимірюваними передвісниками відмов. [33]

У випадку модельно-орієнтованих підходів, якщо модель не включає в себе паразитні параметри реальної схеми, залишковий сигнал має постійне систематичне відхилення, що робить неможливим розрізнення малих несправностей від похибки моделювання. Таким чином, без врахування паразитних параметрів в моделі, можуть виникати хибні позитивні результати (залишковий сигнал перевищує поріг через невідповідність моделі, а не через реальну несправність) та хибні негативні результати (реальні несправності залишаються непоміченими через похибку моделі). [34]

Проблема переходу від катастрофічних до поступових відмов.

Традиційно діагностика силових перетворювачів зосереджувалася на виявленні катастрофічних (жорстких) відмов, таких як обриви та короткі замикання ключових компонентів схеми, які призводять до негайного та повного порушення працездатності системи. Проте сучасний стан силової електроніки вимагає принципово іншого підходу, оскільки більшість відмов у реальних умовах експлуатації сьогодні (і навіть раніше [33]) є результатом поступової деградації компонентів, а не раптових катастрофічних подій. М'які (soft) відмови виникають, коли часткове пошкодження, зношення або старіння компонента призводить до відхилення його параметрів від номінальних значень, при цьому система продовжує функціонувати, але з погіршеними характеристиками. З часом такі м'які відмови можуть перетворитися на жорсткі (hard), наприклад конденсатор, що втратив електроліт внаслідок старіння, перетворюється на обрив схеми [35], через що своєчасне виявлення м'яких відмов є важливим для запобігання аваріям. Проблемою є те, що на ранніх стадіях деградації відхилення параметрів компонентів можуть потрапляти в діапазон допустимих виробничих допусків (наприклад $\pm 5\text{-}20\%$),

створюючи зону невизначеності, де деградацію неможливо відрізнити від нормального розкиду параметрів.

Висновки щодо діагностики силовій електроніки та вбудованих схем.

Таким чином, діагностика систем силовій електроніки та, зокрема, перетворювачів постійного струму має фундаментальні складнощі, пов'язаними з нелінійностями, комутаційною природою, поступовою деградацією компонентів та суттєвим впливом паразитних параметрів. Існуючі традиційні методи забезпечують виявлення жорстких відмов з високою достовірністю, проте задача ідентифікації конкретного деградованого компонента з кількісною оцінкою ступеня відхилення його параметрів (включаючи паразитні) залишається відкритою і перебуває в активному дослідженні. Саме ця задача потребує нового підходу, здатного забезпечити відповідність між вимірними відхиленнями поведінки схеми та конкретними параметричними змінами окремих компонентів.

1.1.5 Існуючі проблеми у діагностиці напівпровідникових пристроїв силовій електроніки

Проблема груп невизначеності (ambiguity groups). Деякі компоненти в напівпровідникових пристроях силовій електроніки об'єднуються у множини (наприклад каскади конденсаторів), де кожен з окремих компонентів має однаковий вплив на спостережувані вихідні параметри. Також бувають ситуації, коли зміна значень деяких різних компонентів має однаковий вплив на вихідні значення пристрою. Через це існує фундаментальне обмеження, оскільки у такому випадку важко (або неможливо) визначити, який конкретно компонент з множини призвів до деградації поведінки всього пристрою. Як, наприклад, у випадках коли тестове рівняння (test equation) для ідентифікації компонента, що працює некоректно, має декілька рішень [36]. Також існує проблема, що декілька компонентів можуть компенсувати вплив один одного, маскуючи несправність.

Проблема балансу між точністю, швидкістю та складністю.

Існуючі підходи до діагностики завдяки наявним компромісам балансують між точністю, швидкістю та складністю, жодний з яких не забезпечує оптимального

балансу. *Апаратно-орієнтовані методи* є дорогими, оскільки вимагають додаткового електронного обладнання, а також погіршують масогабаритні показники пристрою. *Методи на основі машинного навчання* забезпечують високу точність класифікації, однак мають суттєві обмеження. Вони мають надмірні вимоги до обчислювальних потужностей, а також створення системи діагностики на основі машинного навчання вимагає наявності великої кількості даних, збір яких (разом з подальшим тренуванням) є часозатратним процесом [37]. Водночас, *модельно-орієнтовані методи* забезпечують вищу швидкість, але їхня точність критично залежить від якості самої моделі.

Проблема інтерпретованості та довіри.

З розширенням застосування методів у діагностиці на основі даних (машинного навчання) виникає фундаментальна проблема забезпечення не лише точності результатів діагностичної системи, а й їх зрозумілості (інтерпретованості) та рівня довіри людини до них. Методи на основі «чорного ящика» демонструють високу точність, але не надають пояснення для своїх рішень. Інженеру недостатньо знати лише факт наявності некоректної поведінки в електронного пристрою, а потрібно розуміти, який саме фізичний процес спричиняє відхилення в поведінці. Водночас, підходи на основі «білого ящика» надають явне пояснення для кожного рішення, але можуть бути менш точними для складних нелінійних залежностей.

Проблема генералізації.

Фундаментальним обмеженням методів та методик силової електроніки, що ґрунтуються на даних, є недостатня здатність навчених моделей до узагальнення на нові експлуатаційні умови, альтернативні конфігурації обладнання та раніше невідомі режими функціонування. Модель машинного навчання, параметризована на основі набору даних з конкретного електричного пристрою, демонструє істотну деградацію показників точності при застосуванні до топологічно подібних, проте структурно відмінних пристроїв. [38]

Розрив між лабораторною валідацією та промисловим впровадженням.

Систематичний аналіз опублікованих досліджень виявляє розрив між роботами, які були проведені в контрольованих лабораторних середовищах та реальними

польовими умовами [39]. Синтетичні дані, отримані засобами математичного моделювання, та емпіричні вимірювання з експериментальних стендів не відтворюють повний спектр факторів, які є властивими процесу експлуатації обладнання в промисловості: динамічні варіації навантаження, температурні флуктуації робочого середовища, електромагнітна сумісність у реальних мережах, кумулятивні ефекти старіння компонентів.

Згідно з аналізом [39], лише 8% досліджень у галузі діагностики несправностей електричних приводів на основі даних були підтверджені та протестовані на даних, зібраних в польових умовах експлуатації пристрою, тоді як 68% обмежуються експериментальними стендами, а 24% – виключно симуляційними моделями. Наслідком цього розриву є зниження ефективності моделі при переході від контрольованого лабораторного середовища до використання пристрою в реальних умовах: точність виявлення несправностей може знижуватися у порівнянні з показниками, виміряними на тестових даних [38].

Проблема врахування паразитних параметрів у діагностичних моделях.

Як було зазначено в підрозділі 1.1.4, паразитні параметри мають помітний вплив на реальну поведінку силових перетворювачів. Однак окремою і не менш гострою проблемою є їх коректне врахування безпосередньо у діагностичних моделях, де невідповідність між ідеалізованим математичним описом схеми та її реальними характеристиками призводить до систематичних помилок детектування та класифікації несправностей. Модельно-орієнтовані діагностичні алгоритми потребують інформацію про параметри компонентів електричної схеми (ємностей, індуктивностей, паразитних опорів), проте отримання точних значень цих параметрів для реальних систем є складним завданням [4]. Ця проблема набуває особливої актуальності в контексті сучасної електроніки, в тому числі перетворювачах постійного струму, де підвищення частоти перемикання та застосування широкозонних напівпровідників підсилюють вплив паразитних параметрів на точність діагностики [40]. Складність проблеми підвищується через нестаціонарну природу паразитних параметрів. Відсутність єдиного підходу, здатного одночасно враховувати частотну, температурну та деградаційну залежності паразитних

параметрів в режимі реального часу, є важливою невирішеною проблемою у діагностиці силових перетворювачів [4, 41].

1.1.6 Існуючі модельно-орієнтовані підходи діагностики

В даному підрозділі описані деякі приклади робіт, що демонструють різні підходи до детектування несправностей або відслідковування внутрішнього стану пристрою. Не всі вони позиціонуються авторами чітко як такі, що розбиваються на дві фази: детектування (виявлення наявності несправності) та ізоляції/локалізації (виявлення конкретної причини відмови), але задля систематизації принципів роботи різних методів, в цьому підрозділі додається явне розбиття на дві фази, описані автором даної дисертаційної роботи.

У роботі [42] для діагностики підвищуючого перетворювача постійного струму використовуються інтервальні спостерігачі (interval observers), які включають обмежені невизначеності параметрів. Зі спостерігача отримують верхню і нижню межі стану, на основі яких генерується «інтервальний залишок» (residual). Фаза детектування (виявлення наявності відмови) фіксує відхилення залишку від нуля, а локалізація (розрізнення несправностей транзистора або діода) виконується за нахилом (slope) кривої індикатора, оскільки кожна несправність дає різний нахил.

У роботі [43] несправності детектуються методом регресії в часовій області, де параметри моделі перетворювача у просторі станів ітеративно підбираються так, щоб мінімізувати середньоквадратичне відхилення (MSE) між вимірним і передбаченим сигналами струму індуктивності та напруги на виході. Підбір параметрів виконується оптимізатором, причому автори порівнюють метаевристичні та градієнтні алгоритми. Фаза детектування полягає у відстеженні дрейфу оцінених параметрів від номінальних значень, а локалізація виконується безпосередньо через прив'язку кожного параметра до конкретного механізму відмови.

У фундаментальній роботі [44] несправності аналогових схем детектуються методом словника несправностей на основі DC-аналізу (DC fault dictionary), де для кожної попередньо обраної відмови симулятором SYSCAP II обчислюються вузлові напруги постійного струму, що формують її «підпис». Виявлення несправності та її

локалізація полягає в обчисленні суми квадратів відхилень виміряних вузлових напруг від номінальних з усіма можливими «підписами». Той «підпис», що має найменше відхилення, вказує на конкретний несправний компонент.

У роботі [45] для визначення широкого спектру несправностей розподіленої фотоелектричної системи використовується підхід цифрового двійника. В ході роботи системи, співставляються оцінені $z(t)$ та виміряні $y(t)$ виходи системи, генерується вектор похибки (залишку - residual) $\gamma(t)$, на основі якого виконуються обидві фази діагностики. Фаза детектування полягає у відстеженні L_∞ -норми залишку та її порівнянні з пороговим значенням Γ . Локалізація виконується через нормалізацію залишку до одиничного вектора напрямку у просторі несправностей та обчислення L_2 -скалярного добутку між $\gamma(t)$ і кожним членом наперед розрахованої бібліотеки «підписів несправностей» fault signatures (яка формується аналітично), де максимальний добуток вказує на конкретний тип відмови, що дозволяє розрізняти різні типи несправностей фотоелектричної системи.

У роботі [46] для прогнозованого технічного обслуговування ізольованого перетворювача застосовується розширений фільтр Калмана (EKF), який спільно оцінює змінні стану (струм індуктивності, напругу конденсатора) та параметри-предиктори відмов, додані до вектора стану (використовується модель у просторі станів) як повільнозмінні величини. При цьому фактично оцінюються лише індуктивність L та ємність C . Фаза детектування полягає у відстеженні дрейфу оцінених параметрів від номінальних значень, а локалізація виконується через прив'язку параметра до механізму відмови (зменшення L відповідає тепловому старінню та міжвитковому замиканню індуктора, а зменшення C – старінню електrolітичного конденсатора). Іншими словами, дана робота виконує оцінювання параметрів в режимі онлайн.

У роботі [47] для діагностики несправностей перетворювача використовується підхід на основі спостерігачів Люенбергера. Схема діагностики складається з двох класів фільтрів: одного фільтра детектування та банку фільтрів ідентифікації, кожен з яких має структуру, подібну до класичного спостерігача Люенбергера. Фаза детектування полягає в обчисленні функції нев'язки, яка поєднує миттєву L_2 -норму

нев'язки зі зваженою сумою її попередніх значень (з «коефіцієнтом забування» - forgetting factor), та її порівнянні з емпірично визначеним пороговим значенням Γ . Локалізація здійснюється завдяки банку (набору) фільтрів ідентифікації, у якому кожен фільтр налаштований так, щоб відповідати конкретному компоненту. Для кожного з цих фільтрів обчислюється власна функція нев'язки, шукається фільтр із мінімальним значенням серед усіх у банку та визначається компонент, якому відповідає цей фільтр. Цей компонент і є несправним.

1.2 Цифрові двійники як інструмент діагностики електронного обладнання

Аналіз методів діагностики, проведений у підрозділі 1.1, виявив фундаментальне протиріччя між складністю сучасних систем силової електроніки та обмеженнями існуючих підходів. Традиційні структурні методи виявляють переважно «жорсткі» відмови, а методи машинного навчання на основі «чорних скриньок», попри їхню високу точність у класифікації відомих патернів, стикаються з відсутністю фізичної інтерпретованості та передбачуваності результатів.

Фізична детермінованість та фактор довіри у критичних системах.

У критичних сферах застосування (енергетика, авіація, медичне обладнання) вимога до системи діагностики виходить за межі простої ідентифікації некоректної поведінки. Важливим стає фактор верифікованості рішень: інженер повинен розуміти причинно-наслідковий зв'язок між деградацією фізичного параметра та зміною сигналу.

Саме тому методи «білої скриньки», що базуються на фундаментальних законах фізики та детальних математичних моделях, залишаються єдиним підходом, що забезпечує необхідний рівень довіри. Їхні переваги включають:

- **Передбачуваність:** модель працює за детермінованими алгоритмами, що виключає «галюцинації» або аномальні висновки, властиві нейромережам.
- **Достовірність:** діагностичний висновок має чітке фізичне обґрунтування (наприклад, конкретне значення ESR конденсатора).

1.2.1 Концепція цифрових двійників

Цифровий двійник (Digital Twin, DT) є важливою концепцією в контексті четвертої промислової революції, яка забезпечує високий рівень інтеграції між фізичними об'єктами та їхніми віртуальними (математичними, програмними тощо) репрезентаціями. Незважаючи на стрімке зростання кількості наукових публікації з даної тематики та попри існування стандартизованих визначень ISO 23247-1:2021 та ISO/IEC 30173:2023, існує неоднозначність у трактуваннях концепції цифрового двійника в різних сферах застосування. Систематичний аналіз 358 унікальних визначень [48], проведений у 2025 році, засвідчив, що лише 66.48% з них адекватно охоплюють усі необхідні елементи концепції, тоді як залишок 33.52% є неповними або суперечливими. Інший аналіз понад 15000 наукових публікацій [49] підтвердив, що поняття цифрового двійника еволюціонувало від статичних моделей до динамічних симуляцій із обміном даними у реальному часі.

Концептуальні основи цифрового двійника пов'язані з роботами М. Грівза (M. Grieves), який у 2003 році запропонував у рамках управління життєвим циклом виробу (Product Lifecycle Management, PLM) фреймворк, що поєднує фізичний продукт із його віртуальним аналогом через безперервний обмін даними [50]. На той момент часу концепція була основана на трьох компонентах: фізичних сутностях у реальному просторі, віртуальних сутностях у віртуальному просторі та з'єднаннях, що пов'язують реальний та віртуальний простори між собою шляхом обміну даними та інформацією.

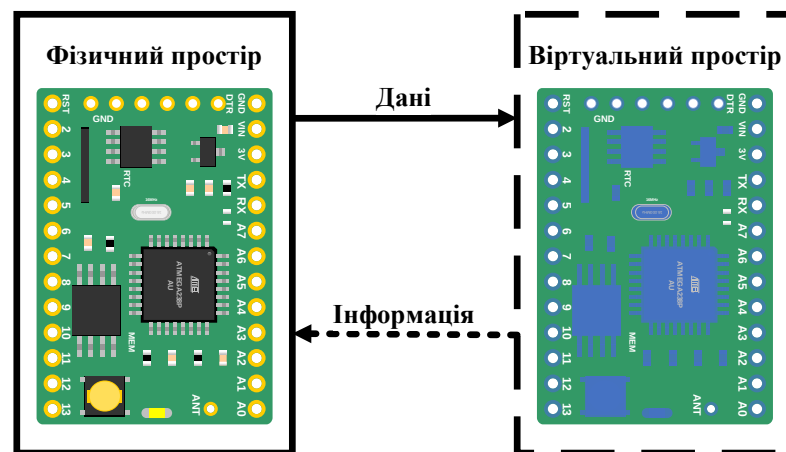


Рис. 1.2. Трикомпонентна модель цифрового двійника за М. Грівзом, малюнок на

Сам термін «Digital Twin» був використаний у технологічній дорожній карті NASA у 2010 році, де цифровий двійник визначався як «мультифізична та мультимасштабна симуляція транспортного засобу або системи, яка інтегрує моделювання високої точності із ситуаційною обізнаністю в реальному часі для прогнозування стану об'єкта, його залишкового ресурсу та ймовірності успіху місії протягом усього життєвого циклу» [51]. У 2012 році NASA визначила цифровий двійник як «інтегрована мультифізична, мультимасштабна, імовірнісна симуляція готового транспортного засобу або системи, яка використовує найкращі доступні фізичні моделі, оновлення датчиків, історію парку тощо, щоб відобразити життя відповідного літаючого двійника» [52]. У роботі [53] класична трикомпонентна модель була розширена до п'ятикомпонентної, яка складається з фізичної сутності, віртуальної сутності, сервісів, даних та з'єднань. Сервіси в даному контексті означають сукупність інкапсульованих функцій, алгоритмів та інструментів, які дозволяють користувачам і системам практично використовувати можливості цифрового двійника для моніторингу, діагностики, оптимізації та прийняття рішень у реальному часі, наприклад моніторинг стану, прогноз відмов, віртуальне тестування тощо. Свої визначення поняттю «Digital Twin» надають Національна академія наук [54], а також стандарти ISO 23247-1:2021 [55] та ISO/IEC 30173:2023 [56].

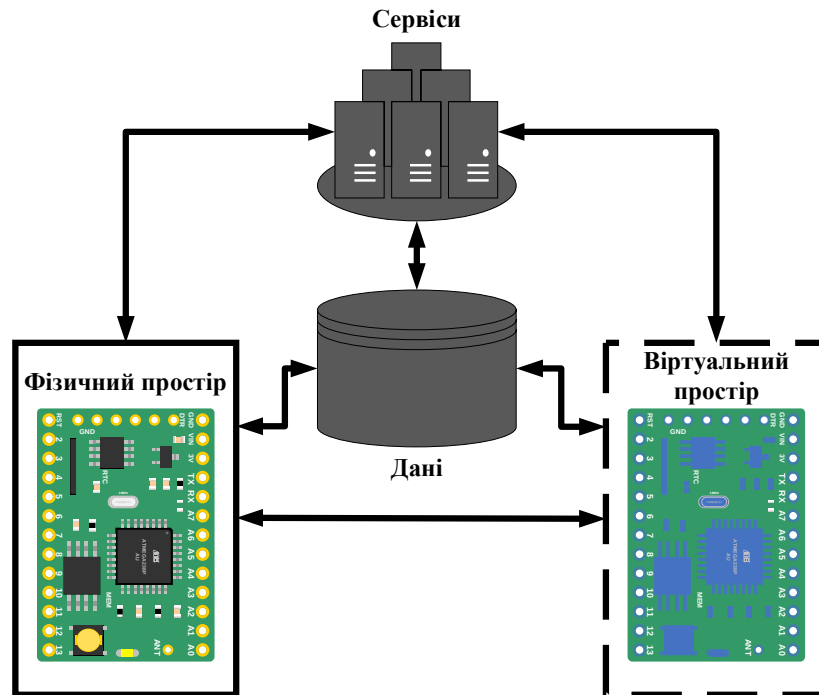


Рис. 1.3. П'ятикомпонентна модель цифрового двійника, малюнок на основі роботи [53]

Класифікація цифрових двійників.

Систематизація всього існуючого різноманіття підходів до створення цифрових двійників є важливою для визначення найбільш придатних типів цифрових двійників для конкретних задач діагностики електронних пристроїв. В літературі існують декілька різних критеріїв класифікації [57-59].

За підходом до моделювання існують три парадигми:

1. Фізичні («білі скриньки») моделі, які базуються на законах фізики, включаючи моделі SPICE, рівняннях перших принципів (моделі у просторі станів, диференціальні рівняння в частинних похідних, аналіз кінцевих елементів). Вони надають пояснюваність та фізичну правдоподібність, але вимагають глибоких знань предметної області та значних обчислювальних ресурсів. [60, 61]
2. Засновані на даних («чорні скриньки») моделі використовують машинне навчання (нейронні мережі, випадкові ліси, автоенкодера), навчені на операційних даних. Вони обробляють складні нелінійні патерни та

пропонують швидкий висновок, але вимагають великих позначених наборів даних та забезпечують обмежену екстраполяцію за межі розподілу навчання. [60, 62]

3. Гібридні («сірі скриньки») моделі поєднують фізичну структуру з калібруванням на основі даних, включаючи фізично інформовані нейронні мережі, які згадувалися в підрозділі 1.1.3. Вони балансують точність, швидкість та ефективність даних, але є складними для проєктування та валідації. [61]

За рівнем деталізації системи цифрові двійники класифікуються на рівні компонента, пристрою, підсистеми, системи та системи систем [63]. Для діагностики електронних пристроїв принципово важливим є рівень компонента, оскільки саме він забезпечує можливість ідентифікації конкретного несправного елемента. У роботі [64] М. Гривз також розрізняє:

1. Digital Twin Prototype (DTP), який створюється на етапі проєктування;
2. Digital Twin Instance (DTI), який є прив'язаним до конкретного фізичного екземпляра;
3. Digital Twin Aggregate (DTA), який об'єднує множину DTI.

За рівнем інтеграції даних. У роботі [59] запропоновано класифікацію, що розрізняє три рівні:

1. Цифрова модель (Digital Model) з ручним обміном даними між фізичними та віртуальними об'єктами;
2. Цифрова тінь (Digital Shadow) з автоматичним одностороннім потоком даних від фізичного до віртуального об'єкта;
3. Цифровий двійник (Digital Twin) з двонаправленим автоматизованим обміном даними.

Ця класифікація є поширеною в літературі, проте саме критерій двонаправленості є найменш однозначним. У систематичному огляді [48], співавтором якого є М. Гривз (основоположник концепції), таксономію [59] піддано аргументованій критиці. По-перше, вона є рекурсивною, оскільки в ній термін «цифровий двійник» визначається як підтип самого себе. По-друге, тип потоку даних

(ручний чи автоматичний) не має значення для фізичного або віртуального об'єкта, який його отримує. По-третє, вимога автоматичної передачі команд від віртуального об'єкта до фізичного присутня лише в незначній кількості з 358 проаналізованих визначень з наукових джерел. Автори [48] наголошують, що зворотний потік від віртуального простору до фізичного полягає у використанні отриманої інформації у фізичному світі, і що людина завжди має бути здатною скористатися цією інформацією, інакше така система не мала би сенсу апріорі. Аналогічно, стандарти ISO 23247-1:2021 [55] та ISO/IEC 30173:2023 [56] визначають цифровий двійник через синхронізацію станів фізичної та цифрової сутностей, не вимагаючи автономного керування фізичним об'єктом.

У даній роботі прийнято позицію роботи [48]: цифровим двійником вважається система, що складається з фізичного об'єкта, його віртуальної репрезентації, синхронізованої з конкретним фізичним екземпляром, та персистентного зв'язку, за якого дані від фізичного об'єкта надходять до віртуального, а інформація, отримана віртуальним об'єктом, використовується для впливу на стан фізичного. Наявність людини в контурі зворотного впливу (human-in-the-loop) не суперечить цьому визначенню. Термін «цифрова тінь» у розумінні [59] у роботі не використовується.

Програмні цифрові двійники проти систем апаратного моделювання для електроніки

Важливим є розрізнення між програмними цифровими двійниками (Software in the Loop, SIL) та системами апаратного моделювання (Hardware in the Loop, HIL). Програмні цифрові двійники є суто програмними математичними моделями всієї системи, які виконуються на звичайному комп'ютері або вбудованому процесорі і не потребують жодного додаткового електронного обладнання в циклі симуляції. Вони, наприклад, використовують математичні моделі перемикавання, дискретизовані за допомогою чисельних методів. Підходи HIL працюють на основі підключення реального електронного обладнання (наприклад, реальний контролер перетворювача постійного струму) до симулятора, який емулює решту системи (навантаження, датчики тощо), причому реальне електронне обладнання працює в такому самому режимі, в якому працювало би при підключенні до реальної системи. [65]

У роботі [58] було продемонстровано, що програмні цифрові двійники можуть бути вбудовані в контролери перетворювачів, використовуючи вирішувачі на основі FPGA для виконання у реальному часі, використовуючи узагальнене розширення поліноміального хаосу (Polynomial Chaos Expansion, PCE) для ймовірнісного моделювання невизначеностей. Цей підхід розділяє модель цифрового двійника за рівнями керування та вбудовує її безпосередньо в контролер, забезпечуючи ймовірнісне порівняння в реальному часі між цифровим двійником та реальним пристроєм.

Особливо перспективним для вбудованих систем є підхід, описаний в [65], де гібридний фізико-математичний цифровий двійник, доповнений інтеграцією з підходом на основі даних та штучного інтелекту, для терморегуляції силовими перетворювачами був реалізований на мікроконтролері STM32, досягаючи циклу обчислень тривалістю 100 мкс. Це підтверджує практичну можливість розгортання програмних цифрових двійників на апаратних платформах з обмеженими ресурсами без використання хмарних обчислень.

Фізико-математичні моделі, зокрема SPICE-симуляції, мають фундаментальні переваги для застосувань в діагностичних системах: інтерпретованість, здатність до узагальнення за межі тренувальних даних та можливість оцінки невимірюваних змінних через віртуальні сенсори [61]. Водночас їх основним обмеженням є обчислювальна складність, яка може бути подолана методами зниження порядку моделі (Model Order Reduction) та оптимізацією обчислювальних алгоритмів [66]. В роботі [67] було запропоновано практичні рекомендації щодо вибору рівня точності моделі в залежності від часових обмежень конкретного застосування. Для систем, де критично важливим є високий рівень швидкодії цифрового двійника, можуть бути використані сурогатні моделі: спрощені, зазвичай створені на основі даних моделі, які працюють швидше за повну фізичну модель і дозволяють швидше отримувати оцінки параметрів. Тоді як для повільніших систем радять використовувати повноцінні фізико-математичні підходи.

1.2.2 Застосування цифрових двійників для діагностики

Чотиришарова діагностична архітектура та виявлення на основі залишків

Діагностика електронних пристроїв на основі цифрових двійників базується на фундаментальному принципі порівняння поведінки реального фізичного об'єкта з передбаченнями його поведінки віртуальною моделлю. Відхилення між вимірюваними та модельними параметрами, так звані залишки (residuals), є основним діагностичним індикатором, що дозволяє виявляти, ізолювати та ідентифікувати несправності [68]. Цифровий двійник виробляє очікувані значення для вимірюваних величин (струми, напруги, температури тощо), і різниця між цими прогнозами та фактичними вимірами датчиків формують основу для подальших діагностичних рішень. Цифровий двійник спочатку встановлює базову лінію нормальної поведінки пристрою, а наявність відхилень від цієї базової лінії, під час виконання діагностики, ініціюють подальший аналіз.

Виходячи з множини оглядових робіт, діагностика на основі цифрових двійників слідує чотиришаровій архітектурі, яка складається з:

1. Шар даних – збір даних з датчиків в реальному часі;
2. Шар моделювання – фізичні, засновані на даних або гібридні моделі поведінки пристрою;
3. Шар аналізу – порівняння реальних та передбачених даних для генерації залишків або оцінок аномалій;
4. Шар застосування – сповіщення про виявлення несправностей, класифікація, рішення щодо обслуговування. [69, 70]

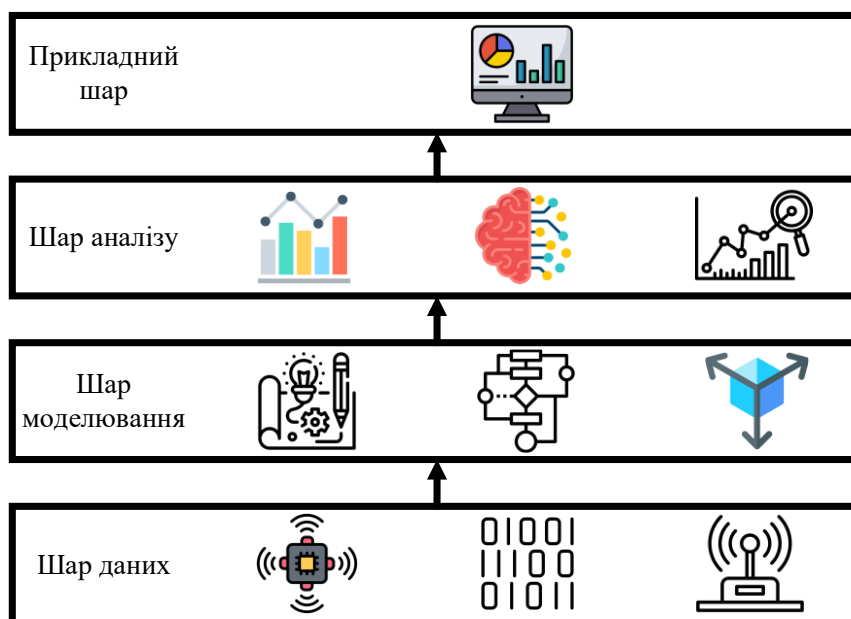


Рис. 1.4. Чотиришарова архітектура цифрових двійників, малюнок на основі роботи [69]

Кібербезпека силовій електроніки

Окрім діагностики фізичних деградацій, концепція порівняння реального об'єкта з його цифровим двійником відкриває перспективи для забезпечення кібербезпеки силовій електроніки. Ті цифрові двійники, що базуються на фундаментальних фізичних законах («білі скриньки»), можуть виступати в ролі незалежного верифікатора цілісності системи керування. У випадку кібер-втручання (наприклад, маніпуляції з алгоритмами ШІМ або несанкціонованої зміни параметрів регулятора), поведінка фізичного пристрою почне суттєво відхилятися від передбаченої моделі двійника. Таким чином, аналіз залишків дозволяє ідентифікувати не лише апаратні відмови, а й спроби злому системи керування, коли внутрішні логічні сигнали контролера перестають відповідати енергетичним процесам у силовій частині.

Існують різноманітні парадигми порівняння (поведінки реального об'єкта з його цифровим двійником) з фундаментально різними діагностичними можливостями: порогові підходи [70], методи статистичного аналізу [71], баєсівські підходи [72], методи виявлення аномалій на основі машинного навчання [73,74] та інші.

1.2.3 Методи побудови цифрових двійників електронного обладнання

Фізичне моделювання електронних схем

Домінуючим підходом до побудови цифрових двійників пристроїв силової електроніки є використання моделей усереднення змінних стану (State-Space Averaging, SSA), що виводяться з диференціальних рівнянь, які описують динаміку струму індуктивності та напруги конденсатора. У роботі [75] було продемонстровано фундаментальну методику, в якій цифрова копія понижуючого перетворювача постійного струму, яка складається з силової частини, схеми вимірювання та замкненого контуру керування, будується повністю на основі рівнянь змінних стану, що дозволяє виконувати неінвазивну оцінку показників стану здоров'я без додаткового електронного обладнання. Цей підхід був розширений в роботі [76], де було продемонстровано цифровий двійник, який динамічно відстежує зміни параметрів фізичної системи та може виявляти відмови контролера в режимі реального часу.

Моделі SPICE детального рівня слугують еталоном та джерелом навчальних даних для побудови цифрових двійників, але їх обчислювальна складність є чинником, що знижує перспективність їх використання в системах, що вимагають отримання результату найбільш швидко. У роботі [77] було проведено систематичне кількісне порівняння глибини моделювання. Даний аналіз виявив, що для швидких перехідних процесів вибір моделі є важливим, на відміну від систем, що вимагають моделювання повільних процесів. Детальні моделі фіксують високочастотні комутаційні перехідні процеси, необхідні для діагностики, чутливої до паразитних параметрів, тоді як поведінкові моделі жертвують цією точністю заради можливості вбудовування. Рішення на основі CPU забезпечують гнучкість, але обмежені в швидкості. FPGA ж, натомість, дозволяють виконувати моделювання з надзвичайно малими кроками часу (менше 1 мкс), що необхідно для детальних комутаційних моделей. У роботі [78] дані SPICE-симуляцій були використані для навчання динамічних нейронних мереж для створення усереднених поведінкових цифрових двійників, які можна вбудовувати безпосередньо в контролери перетворювачів, що вирішило компроміс між швидкістю та точністю, близькою до SPICE моделей.

Підходи на основі даних та гібридні фізично-інформовані методи

Чисті моделі на основі даних з використанням нейронних мереж пропонують гнучкість, незалежну від топології, але мають суттєві обмеження, як було сказано в пункті 1.1.3. Вони так само потребують великих розмічених наборів даних (які часто не є доступними для сценаріїв деградації) і можуть виробляти фізично неправдоподібні прогнози, такі як немонотонні або від’ємні оцінки залишкового терміну експлуатації. Через це фізично-інформовані нейронні мережі, які вже були описані в розділі 1.1.3, являються перспективною парадигмою для побудови цифрових двійників, які ґрунтуються на даних.

Роль паразитних параметрів

Точність будь-якої моделі цифрового двійника фундаментально залежить від того, чи враховані паразитні параметри. Всі проблеми щодо врахування паразитних параметрів, які були висвітлені в розділах 1.1.4 та 1.1.5, так само мають значення в контексті цифрових двійників.

1.2.4 Методи ідентифікації та оптимізації параметрів моделей

Проблема ідентифікації параметрів

Як було зазначено раніше, точність цифрового двійника сильно залежить від паразитних параметрів, які можуть відхилятися на великі значення від номінальних протягом життєвого циклу компонента. Номінальні значення компонентів електронних схем, зазначені виробником, не можуть бути безпосередньо використані як параметри високоточної моделі цифрового двійника. Причини цього мають системний характер. По-перше, виробничі допуски пасивних компонентів зазвичай становлять від $\pm 5\%$ до $\pm 20\%$ для електролітичних конденсаторів та від $\pm 1\%$ до $\pm 10\%$ для індуктивностей, що створює початкову невизначеність параметрів. По-друге, параметри компонентів змінюються в процесі експлуатації внаслідок старіння. Це створює проблему ідентифікації параметрів, а саме визначення фактичних значень параметрів схеми шляхом мінімізації розбіжності між виходами цифрового двійника та вимірюваннями фізичної системи.

Розрізняють два взаємопов’язані поняття: параметричну оцінку та

параметричну оптимізацію. Параметрична оцінка передбачає визначення невідомих параметрів моделі на основі вимірювальних даних, тобто розв'язання оберненої задачі. Натомість, параметрична оптимізація є більш загальним поняттям, що включає мінімізацію (або максимізацію) цільової функції шляхом підбору параметрів у заданому просторі пошуку [79]. У контексті калібрування цифрового двійника ці задачі зливаються: необхідно знайти такий вектор параметрів моделі, за якого розбіжність між вихідними сигналами моделі та фізичного перетворювача є мінімальною. Як показали в роботі [80], задача параметричної ідентифікації перетворювачів постійного струму зводиться до задачі нелінійної оптимізації, оскільки залежність вихідних сигналів від параметрів є суттєво нелінійною, а простір пошуку – багатовимірним.

Специфічна складність калібрування цифрового двійника полягає в тому, що одночасно необхідно ідентифікувати множину параметрів різної фізичної природи: індуктивність, ємність, паразитні опори, параметри напівпровідникових ключів, при цьому маючи обмежений набір вимірювальних даних. Крім того, через внутрішню нелінійність перетворювачів класичні підходи вимагають методів дискретизації, що призводить до накопичення похибок та зниження точності оцінки [27]. Це обумовлює необхідність застосування спеціалізованих методів оптимізації, здатних ефективно працювати в складних багатовимірних просторах пошуку.

Окремим питанням є вибір еталонного вимірювання, на основі якого виконується калібрування цифрового двійника. У відомих роботах з ідентифікації параметрів перетворювачів основну увагу зосереджено на алгоритмі оптимізації та вигляді цільової функції, тоді як критерій вибору цільового сигналу за наявності розкиду експериментальних даних справного пристрою окремо не обґрунтовується. За довільного вибору такого сигналу відхилення відкаліброваної моделі від меж експериментальної вибірки виявляються асиметричними, що не дозволяє безпосередньо використовувати їх як пороги діагностування і потребує окремої процедури налаштування порогів. Отже, задача калібрування цифрового двійника для потреб діагностики має охоплювати не лише вибір алгоритму оптимізації, а й обґрунтований критерій вибору еталонного сигналу.

Методи оптимізації для параметричної ідентифікації

Серед методів оптимізації, що застосовуються для ідентифікації параметрів моделей силових електронних перетворювачів, можна виділити три основні групи: градієнтні методи [79,80], еволюційні (метаевристичні) алгоритми [81-89] та байєсівські оптимізації [90,91]. Кожна з цих груп має свої переваги та обмеження, детальне порівняння популярних методів оптимізації та вибір конкретного для задач даної роботи описано в розділі 3.

1.3 Дистанційні лабораторії як засіб взаємодії з електронним обладнанням

Ефективність систем діагностики на основі цифрових двійників, розглянутих у підрозділі 1.2, залежить від якості та оперативності обміну даними між фізичним об'єктом і його віртуальною моделлю. Ще більш важливою є необхідність збору великої кількості даних для оптимізації та тестування системи моніторингу, яка базується на цифровому двійнику. Як було встановлено в аналізі розриву між лабораторною валідацією та промисловим впровадженням (підрозділ 1.1.5), однією з ключових проблем сучасної діагностики є складність отримання достовірних експериментальних даних у реальних умовах експлуатації.

Цифровий двійник не може існувати в ізоляції. Для його функціонування необхідна інфраструктура, що забезпечує не лише збір сигналів, а й можливість дистанційного керування обладнанням, проведення верифікаційних експериментів та калібрування параметрів моделі в режимі реального часу. У контексті концепції Industry 4.0, де фізичні та цифрові системи інтегруються у єдиний кіберфізичний простір, роль такого технологічного містка відіграють дистанційні лабораторії (Remote Laboratories).

Таким чином, дистанційні лабораторії трансформуються з суто навчальних інструментів у повноцінний засіб взаємодії з електронними пристроями, що забезпечує «фізичну» складову життєвого циклу цифрового двійника. Розуміння еволюції цих систем та їхньої сучасної архітектури є необхідним для побудови інтегрованого середовища діагностики.

1.3.1 Концепція та еволюція дистанційних лабораторій

Концепція дистанційної лабораторії сформувалася ще у 1990-х роках. У масштабному бібліометричному аналізі [92], що охоплює 9523 публікації за 1991-2021 роки, виділили три чіткі еволюційні фази:

1. 1991-2000 – домінування комп'ютерних симуляторів та систем автоматизованого навчання без доступу до фізичного обладнання;
2. 2001-2010 – становлення дистанційних лабораторій із реальним обладнанням, поява флагманських платформ MIT iLab, WebLabDeusto та VISIR;
3. 2010-дотепер – інтеграція хмарних технологій, IoT, доповненої та віртуальної реальності у лабораторні платформи.

Принципово важливим є чітке розмежування термінів:

1. Віртуальна лабораторія – середовище, в якому весь дослідний процес реалізується засобами комп'ютерної симуляції, а результати заздалегідь визначені моделлю;
2. Дистанційна лабораторія – система, що забезпечує віддалений мережевий доступ до реального фізичного обладнання та можливість керування ним у реальному часі;
3. Гібридна лабораторія – поєднання обох підходів. [93]

Ключові платформи

Серед платформ, що визначили розвиток галузі, особливе місце посідає MIT iLab (Massachusetts Institute of Technology, 2001), яка ввела концепцію розподіленої інфраструктури дистанційних лабораторій на базі вебсервісів та заклала архітектурні принципи, що стали еталоном для наступних подібних систем. WebLab-Deusto (Університет Деусто, Іспанія) – відкрита система управління дистанційними лабораторіями (Remote Laboratory Management System, RLMS), доступна понад десятьма мовами. VISIR (Virtual Instrument Systems in Reality, Технологічний університет Блекінге, Швеція) – система на базі апаратних матриць перемикачів, що уможливорює дистанційне з'єднання схем і проведення вимірювань та розгорнута у понад 12 країнах.

Платформа LabsLand постала як комерційний спін-офф WebLab-Deusto та реалізує модель репозиторію дистанційних лабораторій, що об'єднує установи-учасники, надаючи спільний доступ до обладнання. Автори зазначають, що більшість досліджень фокусується на технологічній реалізації платформ, тоді як питання педагогічного проектування та порівняльного оцінювання залишаються значно менш дослідженими.

Існує ще ряд значущих платформ: NetLab, Go-Lab, FORGE, Lab4CE та GOLDi (Grid of Online Lab Devices Ilmenau).

Роль IoT та Industry 4.0 у формуванні сучасної архітектури

Інтеграція технологій Інтернету речей та принципів Industry 4.0 кардинально трансформувала архітектуру дистанційних лабораторій, зробивши їх більш масштабованими, економічно ефективними та сумісними.

Автори роботи [94] розробили відкриту платформу IN4LABS для лабораторій Industry 4.0, засновану на Raspberry Pi та Arduino-сумісних платах, яка дозволяє розгорнути нову дистанційну лабораторію за приблизно 2 години (порівняно з місяцями традиційної розробки). У роботі [95] розробили віддалену лабораторію для керування двигунами на базі FPGA Basys 3, що інтегрує технології IoT та хмарні сервіси Google Firebase для автентифікації, збереження конфігураційних файлів та синхронізації керуючих сигналів у реальному часі.

Архітектура сучасних IoT-лабораторій містить три рівні:

1. фізичний рівень (датчики, мікроконтролери, інше реальне обладнання, яке досліджується/аналізується);
2. мережевий/комунікаційний рівень (MQTT, HTTP/WebSocket, TCP/IP, OPC-UA для промислових застосувань);
3. хмарний/прикладний рівень (веб-інтерфейси, хмарні платформи, інтеграція з LMS). [94,95,96]

1.3.2 Застосування дистанційних лабораторій

Дистанційні лабораторії застосовуються в трьох різних доменах: освітньому, дослідницькому та діагностично-моніторинговому. Кожен із них висуває власні

вимоги до функціональності системи, що робить вибір технологічного рішення особливо відповідальним завданням.

Освітнє застосування

В аналізі [97] було зафіксовано загальний розмір ефекту (Hedges' g) зі значенням 0.686 (що є вище середнього) для впливу віртуальних лабораторій на результати навчання в інженерних спеціальностях, причому по окремим параметрам розмір ефекту є досить великим: навчальна мотивація – 3.57, залученість до навчання – 2.888. Автори роботи [98] в університеті Амріта Вішва Від'япїтхам в Індії показали, що користувачі дистанційної лабораторії проводили досліди у 3 рази частіше порівняно з фізичною лабораторією, виконували завдання на 30% швидше та демонстрували покращення результатів більш ніж на 200%. Автори статті [99] зазначають, що студенти, які використовували дистанційні лабораторії, проводили більше експериментів і досягали кращих результатів на іспитах порівняно з тими, хто займався у звичайних лабораторіях. У межах дослідження цієї роботи було підтверджено, що дистанційні лабораторії забезпечують змогу студентам мати велику гнучкість у плануванні (режим 24/7), а використання відкритого підходу до завдань стимулює залученість через виникнення «потреби в знаннях» (need-to-know). Авторами роботи [100] було розширено доступність дистанційного лабораторного обладнання на сільські школи завдяки використанню платформи LabsLand. Це продемонструвало, що реальне обладнання (фізичні маятники, електричні кола) у дистанційному форматі ефективніше вирішує проблему відсутності лабораторного обладнання в малозабезпечених навчальних закладах, ніж комп'ютерні симулятори.

Дослідницьке застосування

Другим ключовим напрямком є науково-дослідне застосування, де дистанційний доступ до реального обладнання дозволяє проводити експериментальну верифікацію теоретичних моделей без необхідності фізичної присутності дослідника. Автори роботи [101] розробили SmartLab, що являє собою систему на базі мобільного маніпулятора, що автоматизує доступ до застарілого дослідницького обладнання, реалізуючи принципи кіберфізичних систем і концепції Навчальної Фабрики (Learning Factory) – фізичного або цифрового педагогічного

середовища, яке імітує реальне промислове виробниче підприємство для цілей навчання, освіти та досліджень.

Робота [102] систематизує застосування цифрових двійників для верифікації та валідації (verification and validation, V&V) промислових систем автоматизації, виокремивши п'ять ключових напрямів: верифікація проекту, валідація виробництва, віртуальне введення в експлуатацію, операційний моніторинг та оптимізація технічного обслуговування. Автори каталогізували методи V&V, серед яких: model-in-the-loop, software-in-the-loop, hardware-in-the-loop та processor-in-the-loop тестування, усі з яких можуть виконуватися в дистанційному режимі за відповідної інфраструктури.

Верифікація цифрових двійників як нова парадигма

Інтеграція цифрових двійників із дистанційними лабораторіями є досить перспективним, але водночас мало дослідженим прикладним напрямом. У роботі [103] було продемонстровано платформу GOLDi (Grid of Online Lab Devices Ilmenau), яка є гібридною дистанційною лабораторією, що реалізує чотири режими роботи: (1) віртуальний блок керування + віртуальний об'єкт дослідження; (2) реальний блок керування + віртуальний об'єкт дослідження; (3) віртуальний блок керування + реальний об'єкт дослідження; (4) реальний блок керування + реальний об'єкт дослідження. Такий поступовий перехід від чистої симуляції до повного апаратного контролю формує концептуальну основу для використання дистанційних лабораторій з метою верифікації моделей цифрових двійників щодо фізичної реальності.

Найбільш близькою до даної дисертаційної роботи є праця [104], в рамках якої розробили цифровий двійник перетворювача потужності на базі FPGA. Метод аналізує, детектує та порівнює несправності типу обрив на основі збору, розрахунку та аналізу різних характеристик несправностей у порівнянні між реальною системою та системою цифрового двійника.

У систематичному огляді моніторингу стану обладнання на основі цифрових двійників [105] виокремлено три ключові переваги: (1) розширення даних через генерацію додаткових даних про навантаження та пошкодження; (2) злиття фізичних та інформаційних моделей розширює можливості фізичних систем, оскільки

інформаційні моделі дозволяють бачити те, чого не бачить звичайний датчик, а отже передбачати майбутнє обладнання, а не просто констатувати факт відмови; (3) зміна моделі технічного обслуговування від реактивного до прогнозованого. Важливим є спостереження авторів про те, що віртуальні сенсори, основані на технології цифрових двійників, здатні відстежувати параметри у недоступних та небезпечних локаціях. Дана можливість безпосередньо може бути використана для дистанційної діагностики електронних пристроїв. Водночас автори виявляють суттєве обмеження: більшість досліджень, пов'язаних з використанням цифрових двійників, виконуються в лабораторних умовах зі спрощеними сценаріями (ідеальні експериментальні умови), а реальна верифікація залишається рідкістю.

Переваги реального обладнання над симуляціями у діагностичних застосуваннях

Узагальнення наведеного матеріалу дозволяє сформулювати ключові переваги дистанційного доступу до реального електронного обладнання над симуляційними альтернативами, що є визначальними саме у контексті діагностики. По-перше, реальне обладнання відображає паразитні параметри та виробничі відхилення (ESR, ESL, нелінійності компонентів), які у симуляторах або не моделюються, або задаються вручну, тоді як саме вони є первинними діагностичними індикаторами деградації компонентів. По-друге, дистанційна лабораторія забезпечує відтворювані умови для верифікаційних експериментів: один і той самий фізичний об'єкт доступний для багаторазових вимірювань при заданих параметрах, що дозволяє систематично накопичувати дані для уточнення моделі цифрового двійника. По-третє, можливість реального часу означає, що відхилення вихідних параметрів можна спостерігати безпосередньо, без необхідності чекати результатів тривалих симуляцій та без ризику, що модель не враховує якийсь із фізичних ефектів.

Зазначені переваги є концептуальним підґрунтям для використання дистанційної лабораторії як інструменту верифікації цифрових двійників у даній дисертаційній роботі.

1.3.3 Технології побудови дистанційних лабораторій

Архітектурні підходи до побудови дистанційних лабораторій.

Архітектурна складова систем дистанційних лабораторій пройшла кілька еволюційних етапів, кожен з яких відображав відповідний рівень розвитку вебтехнологій та вимоги до масштабованості. Перші системи спиралися на **монолітну клієнт-серверну архітектуру**, де єдиний сервер керував автентифікацією, плануванням, управлінням обладнанням та інтерфейсом користувача. Архітектура iLab Shared Architecture (ISA) Массачусетського технологічного інституту, розроблена у середині 2000-х років, заклала основу для підходу на базі вебсервісів із чітким розподілом на пакетний та інтерактивний режими роботи лабораторій. Хоча сам iLab ISA більше не підтримується, його концептуальний внесок у вигляді федерованого доступу до лабораторій, розподіл функцій управління та виконання, стандартизовані API, продовжує впливати на кожну сучасну платформу [106].

Наразі в працюючих системах домінують **хмарні архітектури**. LabsLand, який є найбільш комерційно успішною платформою дистанційних лабораторій, використовує хмарну інфраструктуру Amazon Web Services (AWS) для свого порталу, водночас розподіляючи фізичне обладнання лабораторій по університетах-партнерах у всьому світі. Така гібридна хмарна модель розділяє управління користувачами, автентифікацію, планування та аналітику щодо навчання (централізовано у хмарі) від керування обладнанням у реальному часі (виконується локально в кожній установі), що зменшує затримку управляючих сигналів при збереженні централізованих адміністративних функцій [107]. Платформа REMLABNET, розроблена Університетом Трнави, реалізує альтернативний підхід, розміщуючи всю систему управління дистанційними лабораторіями у власній приватній хмарі та об'єднуючи незалежні дистанційні експерименти під централізованим сховищем даних. Іншими словами, REMLABNET є федеративною системою, що об'єднує університети-партнери (Трнава, Злін, Прага) в єдиний консорціум із жорсткішою інтеграцією [108].

Мікросервіси та контейнеризація представляють найновішу архітектурну тенденцію. Дослідження [109] демонструє університетську приватну хмару,

побудовану з окремих мікросервісів: автентифікації, шлюзу сервісів, розподіленого сховища, що розгорнуті у Docker контейнерах та організованих за допомогою Kubernetes.

Найрадикальніше архітектурне відхилення представляє **безсерверний одноранговий (peer-to-peer) доступ**. В роботі [110] було представлено edrys-Lite. Це повністю браузерна платформа дистанційних лабораторій, яка використовує WebRTC для прямих peer-to-peer з'єднань та безконфліктні репліковані типи даних (CRDT) для синхронізації даних у реальному часі, повністю усуваючи серверну інфраструктуру. Якщо WebRTC блокується брандмауерами або NAT, легкий WebSocket-ретранслятор забезпечує резервне з'єднання.

Вебтехнології у дистанційних лабораторіях.

Сучасні дистанційні лабораторії застосовують різноманітні вебтехнології без домінування єдиного стеку. WebSockets являються популярним механізмом для двонаправленої комунікації між клієнтами та серверами віддалених лабораторій в реальному часі. WebRTC набуває поширення для peer-to-peer каналів даних. У роботі [111] було проведено систематичний огляд застосувань WebRTC, і було визначено дистанційну освіту як один з ключових випадків використання.

MQTT утвердився як основний протокол для IoT-орієнтованих дистанційних лабораторій. У роботі [112] побудували дистанційну промислову лабораторію для автоматичного управління на основі Node-RED та MQTT, із центральним MQTT-брокером, що реалізує взаємодію між клієнтськими застосунками викладачів та студентів. У роботі [113] продемонстрували MQTT-S (MQTT for Sensor Networks) як захищений комунікаційний протокол для розподілених станцій дистанційних лабораторій із контролем доступу та шифруванням трафіку. В тому числі в [113] було підкреслено перевагу MQTT через можливість обходу обмежень інституційних мереж (брандмауерів), оскільки протокол не потребує публічної IP-адреси для кожної лабораторної станції або відкриття багатьох портів.

REST API слугує основою для більшості управлінських функцій платформ дистанційних лабораторій (планування, автентифікація, отримання метаданих), тоді як управління приладами в реальному часі використовує WebSockets або MQTT.

Інтеграція цифрових двійників із дистанційними лабораторіями.

Конвергенція дистанційних лабораторій та цифрових двійників є передовим напрямком досліджень. У роботі [114] запропоновано фреймворк ReImagine Lab в університеті Талліна, що поєднує цифрові двійники та розширену реальність (XR) для об'єднання лабораторій з безпосередньою роботою, віртуальних та дистанційних лабораторій. В даному випадку цифровий двійник використовується для «телепортації» реального обладнання до студента: він може «підійти» до об'єкта у розширеній реальності, роздивитися його з будь-якого боку, що неможливо зробити через статичну камеру. Водночас, даний об'єкт не є симуляцією – він відтворює положення реального фізичного об'єкту в лабораторії шляхом зчитування його датчиків. Всі команди, направлені студентом, обробляються реальним об'єктом. Студенти сприймають експеримент серйозніше, оскільки знають, що працюють з точною копією реального лабораторного обладнання. До того ж, студент може спочатку протестувати свій контролер на віртуальній моделі, а потім перемкнутися на реальний електронний пристрій. У роботі [115] представили методику дистанційних лабораторій цифрових двійників включно з 3D-моделями двійників, алгоритмами управління фізичним обладнанням та його цифровим двійником у реальному часі. Особливо значущим для сигової електроніки є дослідження [76], яке продемонструвало цифровий двійник перетворювача постійного струму, що динамічно відстежує реальний перетворювач (вихідну напругу та струм індуктора), виявляє відмови, адаптується до змін системи та автономно «відбирає» управління (при виявленні відмови фізичного контролера, цифровий двійник автоматично активується та замінює його, забезпечуючи подальшу роботу системи), який працює в середовищі RT-LAB. Важливо зазначити, що в даній системі цифровий двійник здатний виявляти аномалії в роботі, але не вміє вказувати на конкретну причину (компонент) несправності.

1.3.4 Проблема вибору технологій для дистанційних лабораторій

Технологічна різноманітність як наслідок окремих самостійних розробок.

Екосистема дистанційних лабораторій характеризується надзвичайною

фрагментованістю. У роботі [116] задокументували це явище: «Упродовж останніх років розроблено безліч різних протоколів та систем для побудови та інтеграції дистанційних лабораторій», зазначаючи, що «навіть якщо завдання однакове, більшість дистанційних лабораторій суттєво відрізняються апаратним забезпеченням, що використовується». Кожна установа зазвичай будує власну систему з нуля, застосовуючи різне апаратне забезпечення (NI PXI, Arduino, Raspberry Pi, ESP32, власні плати), різне програмне забезпечення (LabVIEW, Python/Flask, Node.js, Java), різні комунікаційні протоколи (WebSockets, MQTT, REST) та різні підходи до інтеграції (автономна, хмарна, peer-to-peer).

Ця різноманітність має кілька першопричин. По-перше, дистанційні лабораторії обслуговують принципово різні дисципліни: від реального виробничого обладнання для інженерів-механіків до хімічних лабораторій з дистиляційними апаратами, систем лазерних пучків для фізиків та мікроконтролерних систем для фахівців з електроніки. Кожна з таких дисциплін має свої особливі вимоги до електронного обладнання [116]. По-друге, завдяки руху відкритого апаратного забезпечення стало можливим використання низьковартісних альтернатив. Автори роботи [117] зазначають, що Arduino та Raspberry Pi набули популярності, але «реалізація таких проєктів є складною для викладачів і потребує опанування технологій та прийнятої архітектури». По-третє, існує протистояння між пропрієтарними та відкритими екосистемами, що, в свою чергу, фрагментує ринок. До прикладу, комерційні системи на базі LabVIEW та електронного обладнання NI, які працюють в парі, бо є пропрієтарними, співіснують із відкритими альтернативами, такими як WebLab-Deusto та системами на базі Arduino. Пандемія COVID-19 різко прискорила впровадження без сприяння стандартизації. Університети розгортали «аварійні» дистанційні лабораторії. Для прикладу, LabEAD в USP була побудована за 6 місяців [118]. І кожна така реалізація використовувала локально доступні технології, ще більше фрагментуючи стан ринку.

Відсутність уніфікованих методів порівняння технологій дистанційних лабораторій електронного обладнання.

Систематичні огляди незалежно підтверджують відсутність уніфікованого

методу порівняння технологій дистанційних лабораторій. У роботі [119] прямо констатували «Дистанційні лабораторії широко вивчалися в літературі, а чітко окресленою проблемою є відсутність загального шаблону проєктування серед систем онлайн-лабораторій. Ця відсутність стандартизації обмежила масштабованість, інтеграцію, інтероперабельність, прослідковуваність, надійність, безпеку та конфіденційність». Автори роботи [120] дійшли висновку, що «ефективність традиційних очних лабораторій порівняно з нетрадиційними онлайн-, дистанційними чи позааудиторними лабораторіями важко оцінити через відсутність послідовності в літературі щодо термінології, стандартних показників оцінювання та використання широкого різноманіття нетрадиційних лабораторних заходів».

Таким чином, вибір технологій для побудови дистанційної лабораторії, зокрема для силової електроніки з можливостями діагностики на базі цифрових двійників, є завданням, для якого в існуючій науковій літературі відсутнє формальне вирішення. Це обґрунтовує необхідність розроблення методу порівняння інформаційних технологій побудови дистанційних лабораторій електронного обладнання, яка дозволила б об'єктивно зіставляти платформи за визначеною системою критеріїв та підтримувала б прийняття обґрунтованих рішень при проєктуванні систем дистанційного доступу до електронного обладнання. Дана прогалина є однією з ключових наукових проблем, що зумовлюють актуальність цього дисертаційного дослідження та безпосередньо визначають тематику розділу 4.

1.4 Висновки до розділу 1

У даному розділі проведено систематичний аналіз сучасних підходів до діагностики електронного обладнання, методів побудови цифрових двійників електронних систем та технологій дистанційних лабораторій, визначено невирішені проблеми та обґрунтовано напрямки дисертаційного дослідження.

Основні результати розділу:

1. Проаналізовано традиційні методи діагностики електронного обладнання (функціональне тестування, BIST, JTAG/Boundary Scan, ICT) та встановлено їхні фундаментальні обмеження: відсутність покомпонентної діагностики

під час експлуатації, нездатність виявляти параметричні (поступові) деградації компонентів, недостатнє врахування паразитних параметрів та обмежена масштабованість на сучасні друковані плати з високою щільністю компонентів. Показано, що застосування даних методів для сучасної силовій електроніки є нераціональним через нелінійну поведінку компонентів, вплив паразитних параметрів та необхідність діагностики в динамічних режимах роботи під навантаженням.

2. Досліджено сучасні інтелектуальні методи діагностики в контексті Industry 4.0 (CNN, LSTM, автоенкодера, PINN) та виявлено їхні обмеження для застосування в діагностиці силових перетворювачів: методи на основі машинного навчання потребують великих розмічених наборів даних, мають проблему «чорної скриньки» та демонструють недостатню генералізацію на нові експлуатаційні умови; фізично-інформовані нейронні мережі, хоча й знижують вимоги до обсягу даних, залишаються обчислювально витратними для вбудованих систем реального часу.
3. Проаналізовано концепцію цифрових двійників та рівні їх структури, та прийнято його визначення як трьохрівневої структури «фізична сутність – віртуальна репрезентація екземпляра – персистентний зв'язок», за якої зворотний вплив на фізичний об'єкт може реалізовуватися через людину в контурі, яке й буде використовуватися в роботі. Систематизовано підходи до побудови цифрових двійників. Встановлено, що фізико-математичні моделі (зокрема на основі SPICE) мають переваги для систем діагностики завдяки інтерпретованості та здатності до узагальнення, проте їхня точність залежить від коректності ідентифікації паразитних параметрів схеми, значення яких не наводяться в документації компонентів і визначаються як характеристиками окремих елементів, так і конструкцією друкованої плати.
4. Досліджено сучасний стан технологій дистанційних лабораторій, їх еволюцію, архітектурні підходи та сфери застосування. Встановлено, що екосистема дистанційних лабораторій характеризується значною фрагментованістю, а в науковій літературі відсутній уніфікований метод

порівняння технологій їх побудови, що ускладнює обґрунтований вибір технологічної платформи при проектуванні нових систем дистанційного доступу до електронного обладнання.

5. На основі проведеного аналізу визначено три ключові невирішені наукові проблеми, що обумовлюють напрямки дисертаційного дослідження: (1) необхідність розроблення методу онлайн-діагностування на основі цифрового двійника, що забезпечує покомпонентне визначення причин відмов та має обчислювально просту онлайн фазу, придатну для виконання на обладнанні з обмеженими ресурсами; (2) необхідність розроблення методу ідентифікації паразитних параметрів для підвищення точності цифрових двійників силових перетворювачів, включно з обґрунтованим критерієм вибору еталонного сигналу калібрування, що забезпечує придатність відхилень відкаліброваної моделі для використання як порогів діагностування; (3) необхідність розроблення методу порівняння інформаційних технологій побудови дистанційних лабораторій для обґрунтованого вибору платформи верифікації діагностичної системи. Сформульовано мету та завдання дисертаційного дослідження.

Результати аналізу технологій дистанційних лабораторій, наведені в підрозділі

1.3, опубліковано в працях [148, 152].

РОЗДІЛ 2. Інтегрований метод онлайн-діагностування напівпровідникових перетворювачів електроенергії на основі цифрових двійників

Як було показано в розділі 1, існуючі методи діагностування електронного обладнання стикаються з низкою обмежень: традиційні підходи на основі BIST мають обмежену діагностичну глибину, класичні методи машинного навчання потребують значних обсягів навчальних даних, а фізично-інформовані підходи (зокрема PINN), хоча й знижують вимоги до даних, залишаються обчислювально витратними для вбудованих систем реального часу, а також мають проблеми «чорної скриньки». Класичні аналітичні методи, в свою чергу, погано масштабуються на складні нелінійні пристрої. Водночас технологія цифрових двійників відкриває принципово нові можливості для порівняння поведінки реального пристрою з еталонною моделлю.

У даному розділі представлено новий інтегрований метод онлайн-діагностування електронного обладнання, що базується на порівнянні векторних представлень вихідних параметрів реального електронного пристрою з відповідними параметрами його цифрового двійника. Спочатку викладено математичний апарат методу, включаючи формалізацію вхідних і вихідних векторів, нормалізацію різниці та механізм «сірої зони» для забезпечення стійкості до шумів вимірювань (підрозділ 2.1). Далі описано діагностичний алгоритм, побудований на основі таблиці відповідності напрямків відхилень до їх причин, включаючи розширений формат із множинними ступенями впливу (підрозділ 2.2). Підрозділ 2.3 систематизує методи генерації таблиць відповідності, які є центральним елементом практичного застосування методу. Нарешті, підрозділи 2.4 та 2.5 присвячено програмній реалізації методу на прикладі понижуючого перетворювача постійного струму з використанням PySpice/Ngspice, включаючи збір експериментальних даних, калібрування порогових значень та побудову результуючої таблиці відповідності.

Важливою перевагою розробленого методу є його неінвазивний характер, що виражається у повній відмові від інтеграції додаткових внутрішніх датчиків або

допоміжних діагностичних схем у структуру електронного пристрою, окрім датчиків, що вимірюють вихідні показники. На відміну від класичних підходів структурного тестування, які потребують апаратної надлишковості (додаткових датчиків) та збільшують кінцеву вартість пристрою, а також масогабаритні показники, запропоноване рішення спирається виключно на моніторинг доступних зовнішніх сигналів (вхідних та вихідних параметрів). Такий підхід дозволяє реалізувати автоматизовану діагностику навіть для систем із щільним компонуванням, герметичним корпусом або для вже існуючого обладнання, де встановлення внутрішніх сенсорів є технічно неможливим або економічно недоцільним.

Усунення потреби у безпосередньому фізичному зчитуванні внутрішніх показників досягається завдяки перенесенню обчислювального навантаження на сторону цифрового двійника. Віртуальна модель, калібрована за допомогою метавристичних алгоритмів, виступає як динамічний еталон, що з високою точністю відтворює внутрішні процеси об'єкта. Оскільки аналіз відхилень та локалізація несправностей відбуваються шляхом зіставлення зовнішніх реакцій реального пристрою та його цифрового аналога, система отримує здатність математично диференціювати дефекти конкретних внутрішніх компонентів без їх прямого вимірювання. Це забезпечує оптимальний баланс між високою точністю локалізації дефектів та мінімальними вимогами до модифікації самого фізичного обладнання.

2.1 Математичні засади методу векторної діагностики

Метод базується на тому, що електричні схеми можна представити у вигляді моделі, що кожному вектору вхідних значень $\bar{X} = [x_1, x_2, \dots, x_n]$, де n це довжина вхідного вектору, ставить у відповідність вектор вихідних значень $\bar{Y} = [y_1, y_2, \dots, y_m]$, де m це довжина вектору $\bar{Y}$, причому зміна принаймні одного з компонентів вхідного вектора вплине на принаймні один компонент вихідного вектора.

Вхідними значеннями x_i являються як фізичні величини, що подаються на схему ззовні (вхідна напруга перетворювача напруг тощо), так і властивості самої схеми (опори фіксованих резисторів, опори діодів тощо). В ідеалі вектор $\bar{X}$ має покривати всі можливі значення, що мають вплив на поведінку схеми. Для практичного

застосування це не завжди є можливим чи доцільним з точки зору балансу між точністю діагностики та простотою реалізації. Наявність властивостей самої схеми серед компонентів вектора $\bar{X}$ додає можливість детектувати помилки у номіналах, або ж граничні умови (обриви та короткі замикання) відповідних елементів схеми.

Таким чином, вихідний вектор $\bar{Y}$ можна представити точкою у m -мірній системі координат. Задля спрощення малюнків надалі приймемо $m = 2$, оскільки двомірний простір простий для розуміння і візуалізації.

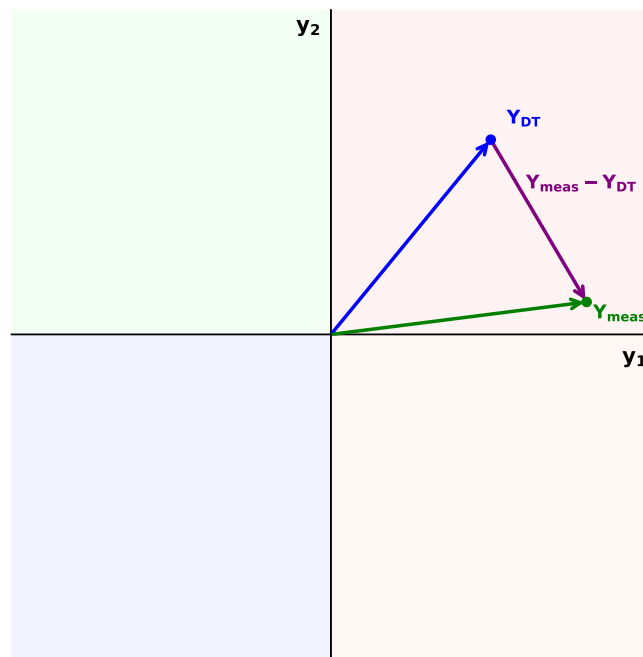


Рис. 2.1. Зображення двох різних векторів та їх різниці у двомірному просторі

Уявимо, що маємо дві пари векторів: $(\bar{X}_{DT}, \bar{Y}_{DT}), (\bar{X}_{meas}, \bar{Y}_{meas})$, причому $\bar{X}_{DT} \neq \bar{X}_{meas} \Rightarrow \bar{Y}_{DT} \neq \bar{Y}_{meas}$.

Умова нерівності вхідних векторів $\bar{X}_{DT}$ і $\bar{X}_{meas}$ має вигляд:

$$\bar{X}_{DT} \neq \bar{X}_{meas} \Leftrightarrow \exists i \in \{1, 2, \dots, n\}, x_{DT,i} \neq x_{meas,i} \quad (2.1)$$

Тобто вхідні вектори є рівними тоді й тільки тоді, коли кожні відповідні компоненти даних векторів є рівними.

На рисунку 2.1 зображено вектори $\bar{Y}_{DT}$ та $\bar{Y}_{meas}$ у двомірному просторі (як було зазначено вище, розглядаємо $m = 2$), а також їх різницю $\bar{Y}_{meas} - \bar{Y}_{DT}$. Оскільки ці

вектори не є рівними, на рисунку вони зображені як такі, що мають різні координати. Це викликано тим, що вхідні вектори $\bar{X}_{DT}$ та $\bar{X}_{meas}$ також не є рівними. Оскільки математична модель ідеального електричного пристрою є детермінованою, тобто при однакових $\bar{X}$ модель генерує однакові $\bar{Y}$, то різниця вхідних векторів $\Delta\bar{X}_{meas,DT} = \bar{X}_{meas} - \bar{X}_{DT} = [x_{meas,1} - x_{DT,1}, x_{meas,2} - x_{DT,2}, \dots, x_{meas,n} - x_{DT,n}]$ має детермінований вплив на різницю вихідних векторів $\Delta\bar{Y}_{meas,DT} = \bar{Y}_{meas} - \bar{Y}_{DT} = [y_{meas,1} - y_{DT,1}, y_{meas,2} - y_{DT,2}, \dots, y_{meas,m} - y_{DT,m}]$.

Таким чином, при умовах володіння таблицею відповідності $\Delta\bar{Y}$ до $\Delta\bar{X}$, для будь-якої заданої $\Delta\bar{Y}$, можливо отримати відповідну $\Delta\bar{X}$, до цього ж отримуючи інформацію по кожному x_i окремо.

Іншими словами, за наявності описаної вище таблиці та пари векторів $(\bar{X}_{DT}, \bar{Y}_{DT}), (\bar{X}_{meas}, \bar{Y}_{meas})$, де $(\bar{X}_{DT}, \bar{Y}_{DT})$ формуються зі значень, отриманих з цифрового двійника («DT» означає Digital Twin) пристрою, що досліджується, а $(\bar{X}_{meas}, \bar{Y}_{meas})$ – з реально поданих на вхід та заміряних з виходу фізичних значень («meas» означає measured), можливо визначити, чим саме обумовлена $\Delta\bar{Y}_{meas,DT}$ і цим самим діагностувати проблему в електронному пристрої. Це створює актуальність задачі формування такої таблиці для конкретного електронного пристрою.

Для спрощення подальших розрахунків треба нормалізувати вектор різниці векторів $\bar{Y}_{meas}$ та $\bar{Y}_{DT}$ так, що нормалізований вектор має наступний вигляд:

$$\Delta\tilde{Y}_{ij} = (\bar{Y}_i - \bar{Y}_j) \oslash Y_j \quad (2.2)$$

де $i \neq j$,

$\oslash$ – операція ділення Адамара (поелементне ділення векторів).

Така нормалізація дозволяє уніфікувати систему координат і виражати кожен компонент нормалізованого вектору як відношення відповідних компонентів заданих векторів. Відповідні компоненти вектору $\Delta\tilde{Y}_{ij}$ позначаються як $\tilde{y}_k$.

Якщо нормалізувати $\Delta\bar{Y}_{meas,DT}$, то отримаємо $\Delta\tilde{Y}_{meas,DT}$, й перенісши початок вектора $\Delta\tilde{Y}_{meas,DT}$ на початок координат, отримаємо представлення, показане на

рисунку 2.2.

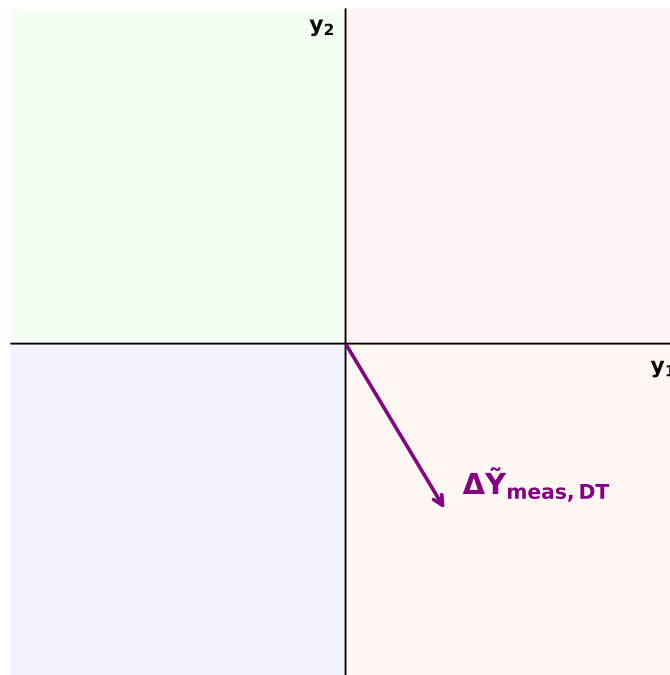


Рис. 2.2. Зображення нормалізованої різниці векторів у двомірному просторі

З рисунку 2.2 видно, що окрім норми вектора $\Delta\tilde{Y}_{meas,DT}$, можливо визначити й напрямок цього вектора (а отже і напрямок відхилення $\bar{Y}_{meas}$ від $\bar{Y}_{DT}$) у просторі. Важливо зазначити, що відносна нормалізація не має впливу на напрямок вектору. Ігноруючи значення норми, ми можемо звести задачу формування таблиці відповідності, що була згадана вище, до таблиці відповідності напрямку вектору різниці вихідних значень до напрямку вектору різниці вхідних значень.

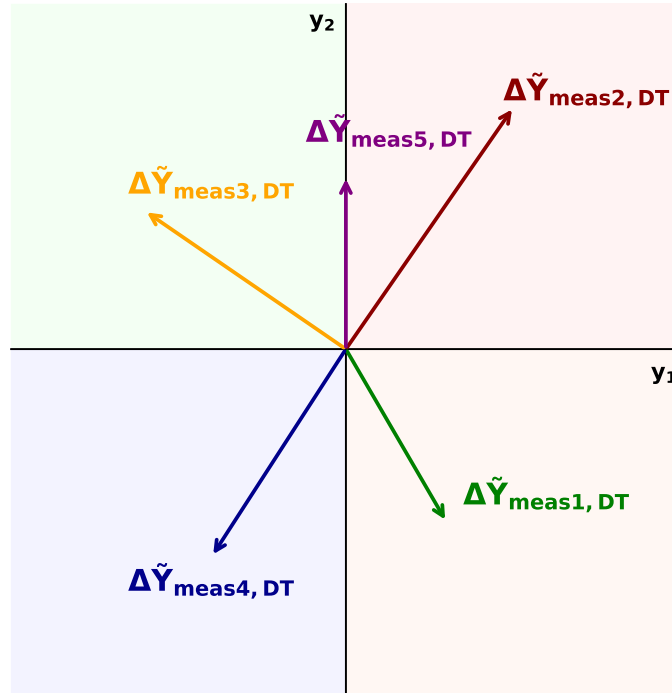


Рис. 2.3. Приклад декількох векторів, кожен з яких направлений в різну сторону

У двовірному просторі (як показано на рисунку 2.3), нормалізований вектор різниці між значеннями з реального пристрою та значеннями, отриманими з математичної моделі, може відхилитися в один з чотирьох квадрантів (вектори $\Delta\tilde{Y}_{meas1,DT}$, $\Delta\tilde{Y}_{meas2,DT}$, $\Delta\tilde{Y}_{meas3,DT}$ і $\Delta\tilde{Y}_{meas4,DT}$). Окремої уваги потребує ситуація, коли один з векторів розташований на (або дуже близько до) одній з осей координат (як вектор $\Delta\tilde{Y}_{meas5,DT}$), про що буде сказано пізніше. Таким чином, таблиця відповідності в ідеальному випадку має містити принаймні один рядок для кожного з квадрантів у випадку двовірного простору. У випадку k -мірного простору, таких рядків, відповідно, має бути 2^k , по одному на кожен можливий напрямок (сектор) відхилення. В реальних задачах, як буде розглянуто пізніше, це не є завжди можливим і доцільним.

Ігнорування значення відстані (норми вектору) дозволяє задати кожен рядок таблиці відповідності вектором $\bar{R} = [r_1, \dots, r_m]$, де m це довжина вектору вихідних значень схеми $\bar{Y}$, а $r_i \in \{+, -\}$, де «+» означає, що в цьому ортанті (квадранті у випадку $m = 2$, октанті у випадку $m = 3$ і т.д.) даний компонент вектора $\bar{Y}_{meas}$ (вимірів з реального пристрою) більше за відповідний компонент вектора $\bar{Y}_{DT}$; «-»,

аналогічно, означає, що менше. Такий підхід відмінняє можливість точного визначення точної величини відхилення певного параметру, оскільки ігнорує конкретні значення, проте значною мірою знижує складність формування таблиці відповідності та, як результат, практичної імплементації методу.

Таким чином, таблиця має мати такий формат (у випадку $m = 2$):

Таблиця 2.1

Шаблон таблиці відповідності при $m = 2$

Вектор $\bar{R}$	...
[-,-]	...
[-,+]	...
[+,-]	...
[+,+]	...

Метод полягає в порівнянні значень на виходах реального пристрою з виходами ідеальної математичної моделі. Це накладає свої обмеження на точність порівняння, оскільки, по-перше, неможливо створити математичну модель, що ідеально повторює поведінку реального пристрою через наявність паразитних параметрів і, по-друге, випадкові шуми вимірювань унеможливають точний збіг $\bar{Y}_{meas}$ та $\bar{Y}_{DT}$. Це призводить до необхідності створення «сірої зони» навколо точки, що знаходиться на початку координат (оскільки початок вектора $\Delta\tilde{Y}_{meas,DT}$ переноситься на початок координат). Одним зі способів формування даної сірої зони є створення відповідної гіперсфери у m -мірному просторі з центром в початку координат, що дозволить порівнювати встановлений радіус ρ даної гіперсфери з відстанню $||\Delta\tilde{Y}_{meas,DT}||$ так, що при виконанні умови 2.3 поведінка пристрою, який відповідає вектору $\bar{Y}_{meas}$, вважається коректною (справною), як зображено на рисунку 2.4.

$$||\Delta\tilde{Y}_{meas,DT}|| \leq \rho \quad (2.3)$$

де ρ – радіус гіперсфери.

Але такий підхід можна покращити, відмовившись від гіперсфери з радіусом ρ на користь порогових значень, які є унікальними для кожного компонента вихідного

вектора, що буде показано в подальшому.

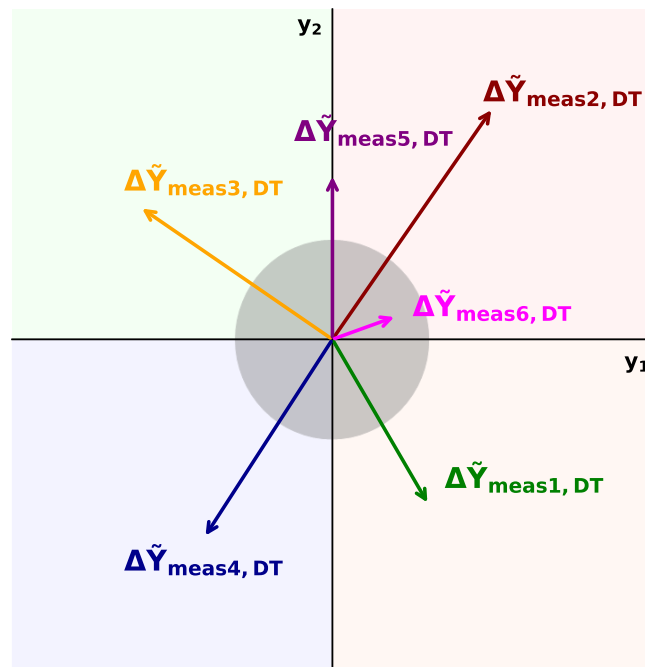


Рис. 2.4. Зображення сірої зони навколо початку координат

На рисунку 2.4 зображено вектор $\Delta\tilde{Y}_{meas6,DT}$, який розташований в межах допустимого відхилення від початку координат. Іншими словами, можна сказати, що електронний пристрій, що діагностується, поводить себе коректно при заданих входах $\bar{X}_{meas6}$. У такому випадку, вочевидь, використання таблиці відповідності не є актуальним, оскільки таблиця потрібна для пошуку причини проблеми, а вектор $\bar{Y}_{meas6}$ не містить значення, які метод вважає за ті, що символізують наявність проблеми.

Задля практичного використання таблиці користувачу (алгоритму, який трансформує отримане з таблиці значення в пояснення, яке є зручним для читання людиною) потрібно визначити вектор $\bar{R}$ шляхом аналізу відхилення виходів реального обладнання від математичної моделі, і, при перевищенні порогового значення, шляхом пошуку по таблиці визначити причину несправності пристрою.

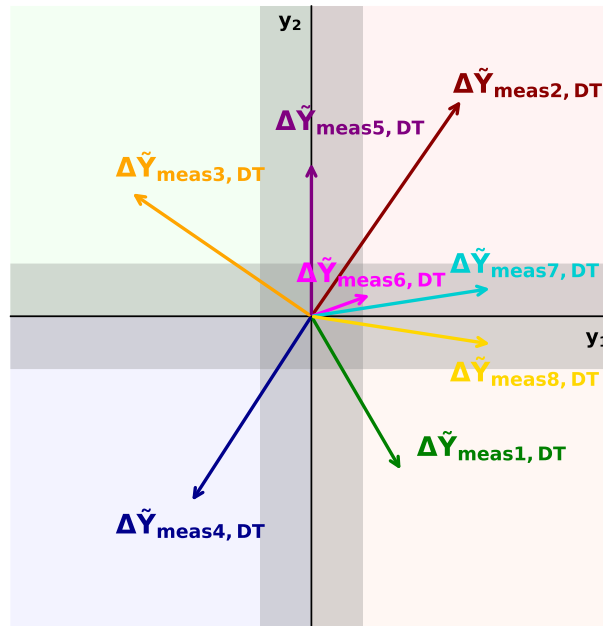


Рис. 2.5. Сіра зона вздовж осей координат

Описані вище перешкоди у порівнянні реальних значень з результатами математичної моделі також вносять свою складність у тому випадку, коли точка, що відображає реально виміряний з обладнання вектор, розташована близько до однієї з осей, як, наприклад, вектор $\Delta\tilde{Y}_{meas7,DT}$ на рисунку 2.5. Дивлячись на цей вектор, який розташований у квадранті I, що відповідає вектору $\bar{R}_7 = [+ , +]$, можливо припустити, що через шуми вимірювань чи інші перешкоди, $\Delta\tilde{Y}_{meas7,DT}$ насправді (якщо відкинути шуми і неідеальності реального обладнання) може мати розташування, близьке до $\Delta\tilde{Y}_{meas8,DT}$ з відповідним вектором $\bar{R}_8 = [+ , -]$. Можливим розв'язком цієї проблеми є формування «сірої зони» також вздовж осей, як і зображено на рисунку 2.5. Відповідний r_i тоді слід позначити «0», тобто у цьому випадку $\bar{R}_7 = \bar{R}_8 = [+ , 0]$. Значення ширини сірої зони для кожного вихідного значення може бути різним. Таким чином, ця характеристика має вигляд вектору $\bar{\theta} = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m]$, де m – довжина вихідного вектору, а θ_i означає ширину сірої зони i -го компонента відповідного вектору $\Delta\tilde{Y}$. Оскільки відповідний вектор $\Delta\tilde{Y}$ є нормалізованим, то порогове значення також виражається у нормалізованих одиницях (фактично відсотках), що виглядає наступним чином:

$$r_i = 0 \Leftrightarrow |\tilde{y}_i| < \theta_i \quad (2.4)$$

Порогові значення слід визначати, виходячи з конкретної практичної задачі. Для спрощення імплементації алгоритму можливо ввести загальне значення θ таке, що

$$\exists \theta \in R: \forall i \in \{1, \dots, m\}, \theta_i = \theta \quad (2.5)$$

Іншими словами, θ слугує загальним значенням (однаковим для всіх компонентів), вираженим у нормалізованих одиницях (відсотках), яке задає ширину сірої зони.

Опціональним є розширений пошук: при спробі пошуку по таблиці відповідності, компоненти вектору $\bar{R}$, що мають значення «0» можна одночасно сприймати як «+» і як «-», що, в результаті, збільшить кількість знайдених рядків в таблиці, а отже, і кількість потенційних причин виникнення некоректної поведінки обладнання. Таким чином метод стає більш стійким до неточностей вимірювань (шумів і т.д), але при тому збільшується рівень невизначеності (результат має більше кандидатів можливих причин несправності).

У тій частині простору, де кожен компонент $\bar{R}$ має значення «0», відхилення вихідного вектору є недостатньо сильними, щоб сигналізувати про некоректну поведінку пристрою. Таким чином, використання вектору $\bar{\theta}$ також дозволяє замінити описаний вище підхід з гіперсферою на унікальні порогові значення для кожного компонента вихідного вектора, що підвищує точність та конфігурованість алгоритму, оскільки дозволяє встановити різні порогові значення для різних фізичних величин.

2.2 Формалізація діагностичного алгоритму на основі таблиць відповідності

Результат пошуку в таблиці має вказувати на конкретну причину (або набір можливих причин), що призвели до некоректної роботи електронного пристрою. Оскільки вхідні вектори $\bar{X}_{DT}$ та $\bar{X}_{meas}$ складаються, в ідеальному випадку, з усіх факторів, що мають вплив на поведінку пристрою (як реального, так і моделі), то і, відповідно, причиною дефектності вихідного вектора $\bar{Y}_{meas}$ є відхилення вектора $\bar{X}_{meas}$ від вектора $\bar{X}_{DT}$ як мінімум в одній з пар компонентів векторів, що впливає з

визначення нерівності векторів. Запропонований метод розглядає лише одиничні дефекти (відхилення лише одного компонента вектору $\bar{X}_{meas}$ від відповідного компонента вектора $\bar{X}_{DT}$).

Оскільки причиною конкретного напрямку відхилення вектору $\bar{Y}_{meas}$, а отже і значення вектора $\bar{R}$, є відхилення одного або більше компонентів вектора $\bar{X}_{meas}$, то можна ввести поняття вектора $\bar{E} = [e_1, e_2, \dots, e_n]$, де n це довжина вектору $\bar{X}_{meas}$, а $e_i \in \{-, 0, +\}$. Якщо збільшення значення конкретного компонента x_i слугує причиною відхилення вектору $\bar{Y}_{meas}$, то відповідний компонент вектора $\bar{E}$ приймає значення «+», якщо зменшення, то «-», якщо ж зміна компонента вектору $\bar{X}_{meas}$ майже не впливає (до межі, визначеною відповідним θ_i) на це конкретне відхилення вектора $\bar{Y}_{meas}$ – «0».

Таким чином, можливим прикладом таблиці відповідності при $m = 2, n = 3$ може бути:

Таблиця 2.2

Приклад таблиці відповідності вектору $\bar{E}$ до $\bar{R}$

Вектор $\bar{R}$	Вектор $\bar{E}$
[-,-]	[0,+,+]
[-,+]	[+,0,0]
[+,-]	[0,0,-]
[+,+]	[-,0,+]

Для прикладу розглянемо перший рядок таблиці, який у відповідність до вектору $\bar{R} = [-, -]$ ставить вектор $\bar{E} = [0, +, +]$. Цей рядок означає, що до помітної (більшої за порогове значення) зміни вихідних значень y_1 та y_2 в сторону зменшення призвело збільшення або x_2 , або x_3 .

Запропонований вище формат таблиці може бути достатньо ефективним і точним для багатьох електричних схем і його можна використовувати для реальних застосунків. Водночас, він ігнорує той факт, що при різних кратностях зміни вхідних значень ($\times 10, \times 10^6, \times 10^{12}$) вплив на вихідне значення буде різним (рис. 2.6):

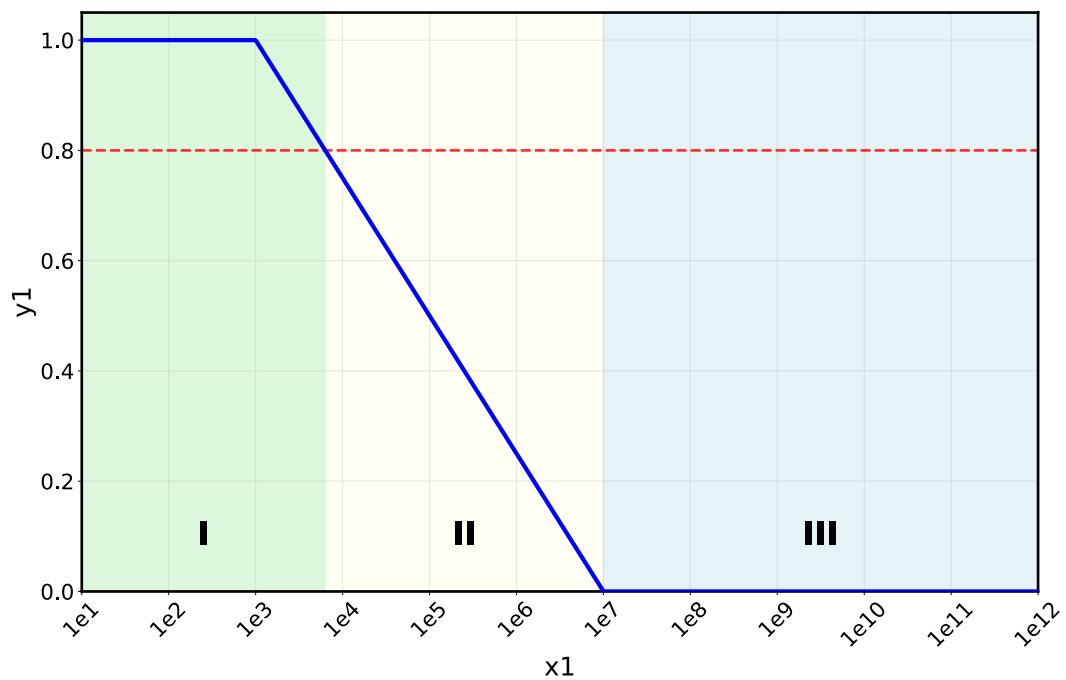


Рис. 2.6. Зображення різних зон значення x_1 , що впливає на значення y_1

На рисунку 2.6 зображено приклад можливого впливу зміни компонента x_1 вхідного вектору $\bar{X}$ на компонент y_1 вихідного вектору $\bar{Y}$. По обох осях зображені множники зміни відповідних значень. Червона штрихована лінія зображує межу, до якої r_1 приймає значення «0», а після якої – «–», як було описано вище. Цей приклад показує, що в залежності від кратності зміни вхідного значення, вплив на вихідне значення може бути різним. Графік розділено на 3 зони:

I) Зона до моменту, коли множник y_1 спускається до відмітки 0.8, що слугує перехідним моментом для значення e_1 з «0» в «–». Це зона значень x_1 , які не впливають на r_1 (відповідно до y_1).

II) Зона, де множник y_1 знаходиться у проміжку (0.8; 0). Це є зона, яка відповідає $r_1 = \text{«–»}$.

III) Зона, починаючи з якої значення y_1 стає «0». Ця зона також відповідає $r_1 = \text{«–»}$, але вона може мати відмінний від зони II фізичний сенс. Наприклад, якщо x_1 це певний опір, а y_1 – напруга, то у зоні III настає момент, коли опір починає поводити себе як розрив на схемі.

Таким чином, для покращення точності діагностики, гарним рішенням є перетворення вектору $\bar{E}$ на вектор множинних станів. В такому випадку:

$$\bar{E} = [e_1, e_2, \dots, e_n], e_i \subseteq \{0\} \cup \{+k, -k | k \in N, 1 \leq k \leq K\}, \quad (2.6)$$

де n – довжина вхідного вектору $\bar{X}$,

K – ціле позитивне число, що задає максимальну кратність повторення знаків «+» або «-» («0» нема сенсу повторювати).

Кількість повторення знаків відображає відносну ступінь зміни. У прикладі з рисунку 2.6, $K=2$ (тобто ми допускаємо максимум дві ступені зміни). Але ця кількість може бути змінена за потреби.

Іншими словами, e_i – множина, що може включати такі елементи при $K=2$:

- 0 (відсутність значущого впливу)
- +, + + (різний ступінь збільшення)
- -, - - (різний ступінь зменшення)

У випадку рисунку 2.6 зона I відповідає $e_1=\{0\}$, зона II відповідає $e_1=\{-\}$, а зона III – $e_1=\{- -\}$. Таким чином, типовий приклад модифікованого вектора $\bar{E}$ в таблиці може мати вигляд $\bar{E} = [\{+, ++\}, \{0\}, \{-\}, \{- -\}]$, де кожна множина e_i описує можливі ступені впливу відповідного компонента вхідного вектору $\bar{X}$ на відповідну зону відхилення вихідних параметрів пристрою.

Така зміна формату таблиці не є критичною і дозволяє застосункам, що використовували попередній формат, легко розширити свій алгоритм за потреби збільшення точності діагностики.

Представлений діагностичний алгоритм використовує дискретну класифікацію напрямків відхилень, що принципово відрізняє його від інших якісних підходів до аналізу поведінки систем. Для більш чіткого позиціонування запропонованого підходу доцільно порівняти його з традиційною нечіткою логікою, яка також оперує якісними категоріями.

Порівняння з традиційною нечіткою логікою. Важливо зазначити, що запропонований метод використовує дискретні стани («+», «-», «0») з чіткими пороговими значеннями, що відрізняється від традиційної нечіткої логіки. На відміну від нечіткої логіки, яка оперує функціями належності та ступенями істинності в діапазоні $[0,1]$, запропонований підхід використовує чітке розмежування станів за

допомогою порогових значень. Таке рішення було прийнято для спрощення практичної реалізації та зменшення обчислювальних вимог, зберігаючи при цьому основну перевагу якісного підходу – стійкість до шумів вимірювань та простоту інтерпретації результатів.

Таким чином, запропонований підхід свідомо жертвує плавністю переходів між станами, характерною для нечіткої логіки, на користь однозначності інтерпретації результатів (кожен вектор $\bar{R}$ детерміновано відповідає рядкам таблиці) та простоти калібрування (для кожного компонента налаштовується єдине порогове значення замість функції належності). Додатковою перевагою є зниження обчислювальних вимог онлайн-фази, хоча обидва підходи в принципі можуть бути реалізовані на обладнанні з обмеженими ресурсами. Далі описано покроковий алгоритм практичної реалізації методу.

Реалізація методу. Перед використанням методу необхідно виконати етап ініціалізації, який складається з наступних кроків:

1. *Створення моделі цифрового двійника:* розробка математичної моделі, ідентифікація паразитних параметрів, тестування і валідація точності моделі у порівнянні з наявним справним пристроєм, визначення компонентів векторів $\bar{X}$ та $\bar{Y}$.

2. *Створення таблиці відповідності:* використовуючи один з чотирьох запропонованих методів (систематичного моделювання, аналітичного виводу, формалізації експертних знань, експериментальний), або будь-який інший (включаючи гібридний підхід).

3. *Налаштування ширини сірої зони:* визначення θ_i для кожного компоненту окремо, або ж визначення загального значення θ .

4. *Калібрування системи:* тестування і валідація значень таблички відповідності. Корегування $\bar{\theta}$ за потреби.

Використання даного методу виконується шляхом періодичного (частота та умови залежать від конкретного застосування) запуску алгоритму, що отримує пари вхідного і вихідного векторів, визначає відповідний вектор $\bar{R}$, а далі аналізує їх за допомогою таблиці відповідності. Якщо з кожним наступним запуском алгоритму

робити вимірювання зберігаючи такі ж самі значення вхідного вектора, то, зберігаючи отримані пари векторів, можна відстежувати дрейф вектора $\bar{Y}_{meas}$ в просторі, а отже і швидкість та напрямок деградації поведінки електронного пристрою, що відкриває можливості для покращення методу в бік прогнозування часу до виникнення дефекту. Це відкриває можливість для подальшого розвитку методу, а саме розробки алгоритму відстежування змін поведінки пристрою і прогнозування відмови на основі характеру і швидкості даних змін.

З погляду структури цифрового двійника запропонований метод реалізує персистентний двонаправлений зв'язок між фізичним перетворювачем та його віртуальною репрезентацією. Прямий потік (від фізичного об'єкту до віртуального) є автоматичним, оскільки у кожному циклі діагностування виміряні режимні параметри пристрою (режимна частина вектора $\bar{X}_{meas}$: V_{in} , D , R_{load} , C) подаються на модель, яка обчислює еталонний вектор $\bar{Y}_{DT}$ для поточної робочої точки. Модель при цьому є синхронізованою саме з даним екземпляром пристрою завдяки ідентифікованим паразитним параметрам: R_C , R_D , $R_{DS(ON)}$, L_C , t_{Gr} , t_{Gf} , I_S (розділ 3), тобто є цифровим двійником екземпляра (DTI за [64]). Зворотний потік (від віртуального об'єкту до фізичного) реалізується через людину в контурі: вектор $\bar{R}$ та результат пошуку в таблиці відповідності передаються оператору як інформація про стан і причину відхилення, на підставі якої ухвалюється рішення про обслуговування, що змінює стан фізичного об'єкта. Кількісний ефект цього зворотного впливу на готовність перетворювача оцінено у підрозділі 5.4. Автоматичне замикання зворотного контуру (наприклад, зниження навантаження, зміна коефіцієнта заповнення або перемикання на резервний перетворювач) технічно можливе через канал керування Лабораторний сервер $\rightarrow$ MCU (підрозділ 5.1), однак свідомо не реалізовано в межах роботи, оскільки автономне втручання діагностичної системи в керування силовим обладнанням є окремою задачею функціональної безпеки.

Метод використовує скалярні значення як компоненти вхідних і вихідних векторів. Використання векторів для детектування некоректної поведінки також можливе, наприклад як RMS відхилення вихідного сигналу з реального пристрою від

математичної моделі. Але така метрика не може надати необхідного «напрямку» відхилення, що не дозволить діагностувати причину некоректної поведінки.

На наступному рисунку зображено блок-схему алгоритму реалізації методу в базовому вигляді, без врахування дрейфу $\bar{Y}_{meas}$:

Ініціалізація системи:

1. Створення моделі цифрового двійника
2. Генерація таблиці відповідності
3. Налаштування ширини сірої зони
4. Калібрування системи

Періодичний алгоритм:

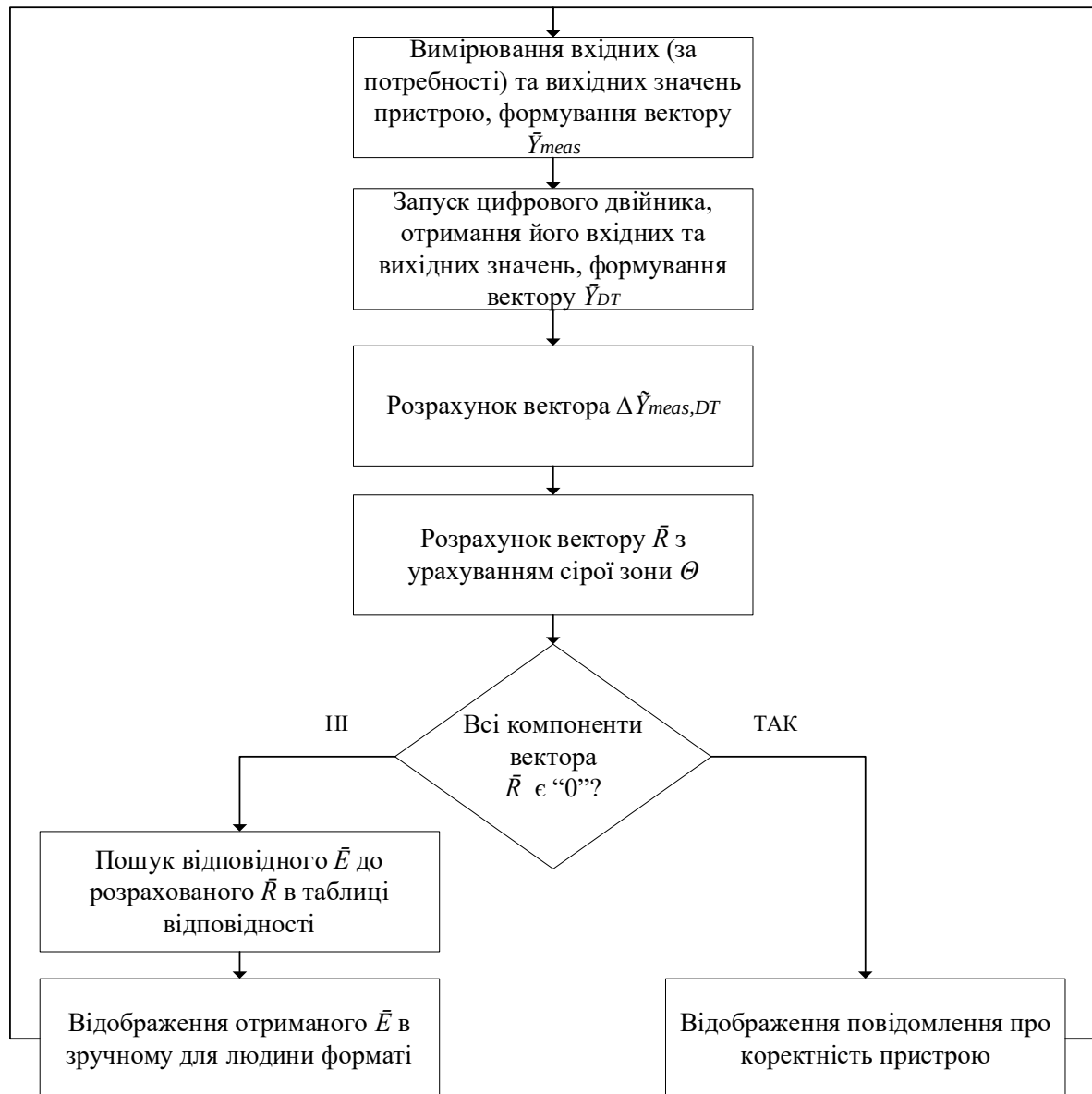


Рис. 2.7. Блок-схема реалізації методу

Запропонований метод має такі переваги:

1. *Врахування паразитних параметрів:* Використання генетичного алгоритму (описано в розділі 3) для визначення реальних значень паразитних параметрів

дозволяє досягти того, що нев'язка між сигналами цифрового двійника та справного об'єкта зводиться практично до нуля для конкретного екземпляра пристрою. Завдяки усуненню постійної складової неузгодженості між цифровим двійником (моделлю) та реальним пристроєм, ширину сірої зони можна задати значно тіснішою, що робить можливим помічати малі параметричні відхилення компонентів, які за використання довідкових значень (з документацій) параметрів залишаються в межах порога й не виявляються.

2. *Стійкість до неточностей вимірювання:* Абстрагування від конкретних числових значень робить метод менш чутливим до шумів вимірювань і випадкових відхилень. Зникає необхідність у високоточному вимірюванні параметрів, що є дуже актуальним у реальних умовах, де наявні шуми й неточності, фільтрація яких призводитиме до зменшення точності діагностики.

3. *Простота реалізації алгоритму:* Від алгоритму, що виконує діагностику або моніторинг стану вимагається лише виміряти (або задати фіксовані значення в налаштуваннях для параметрів самого пристрою) значення входів і виходів пристрою, подати відповідні значення на цифровий двійник, нормалізувати вектор різниці виходів реального пристрою і цифрового двійника, після чого порівняти кожен компонент цього вектору з його відповідною шириною сірої зони, чим отримати вектор R і здійснити пошук по таблиці відповідності.

4. *Низькі вимоги до обчислювальних ресурсів онлайн фази:* онлайн-фаза алгоритму зводиться до $O(1)$ арифметичних операцій для конкретного екземпляру (обчислення та нормалізація різниці векторів, порівняння з пороговими значеннями) та пошуку в таблиці відповідності, розмір якої для практичних задач не перевищує десятків рядків (19 рядків для понижуючого перетворювача, розглянутого в розділі 2.5), що потребує менше одного кілобайта пам'яті. Еталонний вектор $\bar{Y}_{DT}$ при цьому може бути отриманий трьома способами: (1) одноразовою симуляцією з кешуванням результату для пристроїв, що працюють у фіксованій або повторюваній робочій точці; (2) попереднім обчисленням сітки еталонних значень для діапазону робочих точок з подальшою інтерполяцією; (3) обчисленням в режимі онлайн за допомогою швидкої моделі. Важливо, що метод не накладає обмежень на технологію побудови

цифрового двійника: детальна SPICE-модель, використана в даній роботі, може бути замінена аналітичними виразами вихідних характеристик, моделлю зниженого порядку або сурогатною моделлю, навченою на даних детальної симуляції (аналогічно до підходу [78]), за умови що така модель відтворює всі компоненти вектора Y із достатньою точністю. Це дозволяє виконувати онлайн-фазу на малопотужному обладнанні на кшталт одноплатних комп'ютерів (що продемонстровано в розділі 2.5 навіть при SPICE моделюванні), а також потенційно мікроконтролерів.

5. *Простота і зрозумілість інтерпретації:* Відносні позначення на кшталт «+», «++» або «-», «--» легко читаються людиною і дозволяють швидко зрозуміти характер впливу, не аналізуючи конкретні значення.

6. *Гнучкість у роботі з нелінійними залежностями:* Відносні позначення дозволяють враховувати нелінійність впливу параметрів, коли не завжди можливо підібрати конкретні порогові значення, які б чітко розмежовували різні сценарії. Наприклад, у випадку нелінійного пристрою чітке числове значення важко задати, але якісна оцінка ступеня зміни легко піддається визначенню.

7. *Вирішення проблеми груп невизначеності:* Оскільки результатом алгоритму є одночасно всі можливі причини, які призводять до такого конкретного напрямку відхилення вихідного вектору пристрою, то це автоматично вирішує проблему груп невизначеності, яка була описана в підрозділі 1.1.5, оскільки алгоритм не робить припущення про лише одну можливу причину, а відображає всі потенційні причини одночасно. Цей пункт не враховує випадки однакових компонентів (наприклад паралельних конденсаторів).

Приклад використання. Розглянемо приклад використання періодичного алгоритму даного методу для найпростішої електричної схеми – дільника напруги. Схема виглядає наступним чином:

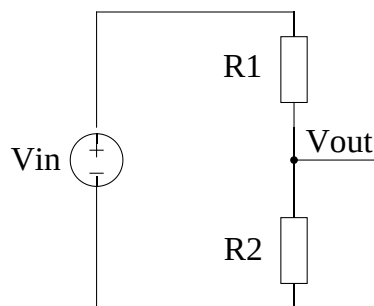


Рис. 2.8. Схема дільника напруги для прикладу використання методу

Схема складається з вхідного джерела напруги V_{in} та двох резисторів: $R1$ та $R2$.

Припустимо, що ширина сірої зони становить 5%, а отже $\bar{\theta} = [\theta_1, \theta_2] = [0.05, 0.05]$, а таблиця відповідності вже визначена і має наступний вигляд (вона відповідає дійсності для дільника напруги):

Таблиця 2.3

Таблиця відповідності вектора $\bar{E}$ до $\bar{R}$ для прикладу з дільником напруги

Вектор $\bar{R}$	Вектор $\bar{E}$	Пояснення
[-,+]	[0,0,-]	Значення $R2$ занижене
[-,-]	[-,0,0]	Вхідна напруга занижена
[+,+]	[+,-,0]	Значення $R1$ занижене або вхідна напруга підвищена

1. Визначимо вхідні та вихідні вектори даного пристрою. Входами системи є значення напруги V_{in} та опорів R_1 та R_2 . Отже, вхідний вектор має вигляд $\bar{X} = [V_{in}, R_1, R_2]$. Виходами системи слугують напруга на виході V_{out} та струм через опори I . Отже, вихідний вектор має вигляд $\bar{Y} = [V_{out}, I]$, де $V_{out} = \frac{V_{in} \times R_2}{R_1 + R_2}$, а $I = \frac{V_{in}}{R_1 + R_2}$.

2. Подамо на вхід цифрового двійника значення $\bar{X}_{DT} = [12\text{В}, 1000\Omega, 2000\Omega]$, отримуємо вихідні значення $\bar{Y}_{DT} = [8\text{В}, 4\text{мА}]$. Припустимо для прикладу, що вхідні значення реального пристрою мають вигляд $\bar{X}_{meas} = [12\text{В}, 1000\Omega, 1500\Omega]$, що, відповідно, означає наступні вихідні значення: $\bar{Y}_{meas} = [7.2\text{В}, 4.8\text{мА}]$.

3. Виразуємо нормалізований вектор різниці: $\Delta\tilde{Y}_{meas,DT} = (\bar{Y}_{meas} - \bar{Y}_{DT}) \oslash Y_{DT} = [7.2 - 8, 4.8 - 4.0] \oslash [8, 4] = [-0.8\text{В}, 0.8\text{мА}] \oslash [8\text{В}, 4\text{мА}] = [-0.1, +0.2]$.

4. Застосуємо сіру зону

$$|\tilde{y}_1| = |-0.10| = 0.10 > \theta_1 = 0.05 \rightarrow r_1 = \text{«} - \text{»}$$

$$|\tilde{y}_2| = |0.20| = 0.20 > \theta_2 = 0.05 \rightarrow r_2 = \text{«} + \text{»}$$

Отже, результуючий вектор має вигляд $\bar{R} = [-, +]$. Пошук по таблиці відповідності (табл. 2.3) по заданому $\bar{R}$ вказує на причину $\bar{E} = [0, 0, -]$, що означає занижене значення R_2 , що, і є правильною причиною відхилення вихідних значень.

2.3 Методи генерації таблиць відповідності.

Після формалізації діагностичного алгоритму ключовим практичним завданням стає побудова таблиці відповідності для конкретного електронного пристрою. Якість цієї таблиці безпосередньо визначає діагностичну здатність системи, тому систематизація підходів до її генерації є самостійною науковою задачею. У цьому підрозділі розглянуто чотири основні методи генерації, а також гібридний підхід, який і рекомендується для практичних застосувань.

2.3.1 Метод систематичного моделювання

Цей метод передбачає введення контрольованих відхилень у параметри цифрового двійника з подальшим аналізом їх впливу на вихідні характеристики. Алгоритм даного методу має наступний вигляд:

1. Визначення важливих параметрів: Визначення всіх компонентів вектору $\bar{X}$, які можуть зазнавати деградації (опори резисторів, ємності конденсаторів, параметри напівпровідникових приладів тощо).

2. Планування експериментів: Для кожного параметра x_i визначаються нормальні значення $x_{i,norm}$ і діапазони відхилень $[x_{i,min}, x_{i,max}]$.

3. Моделювання: Для кожного параметра x_i послідовно задаються значення від $x_{i,min}$ до $x_{i,max}$, розраховується відповідних вихідний вектор $\bar{Y}_{sim}$ і визначається нормалізований вектор відхилення $\Delta\tilde{Y}_{sim,norm}$.

4. Побудова відповідностей: На основі отриманих результатів будуються залежності напрямку відхилення $\bar{R}$ від характеру зміни параметрів $\bar{E}$.

2.3.2 Метод аналітичного виводу для простих схем

Для лінійних або слабо нелінійних схем можливе аналітичне визначення залежностей між вхідними параметрами та вихідними характеристиками. Даний підхід має наступний алгоритм:

1. Аналітичне моделювання: Виведення математичних залежностей $\bar{Y} = f(\bar{X})$.

2. Лінеаризація: Для нелінійних залежностей використовується лінеаризація навколо робочої точки: $\frac{\partial y_j}{\partial x_i} \approx \frac{\Delta y_j}{\Delta x_i}$.

3. Визначення знаків впливу: На основі частинних похідних визначаються знаки впливу кожного параметра:

Якщо $\frac{\partial y_j}{\partial x_i} > 0 \rightarrow$ збільшення x_i призводить до збільшення y_j .

Якщо $\frac{\partial y_j}{\partial x_i} < 0 \rightarrow$ збільшення x_i призводить до зменшення y_j .

4. Побудова відповідностей: Комбінування знаків впливів формує рядки таблиці відповідності.

2.3.3 Метод формалізації експертних знань

Цей метод застосовується у випадках систем, де експертні знання про поведінку схеми можуть бути формалізовані у вигляді правил. Процес має наступний вигляд:

1. Збір експертних знань: аналіз джерел, опитування фахівців з діагностики конкретного типу обладнання тощо.

2. Структурування знань: Перетворення якісних описів у формалізовані правила виду: «ЯКЩО [конкретна причина], ТО [конкретний дефект]».

3. Верифікація правил: Перевірка сформульованих правил на тестових випадках або історичних даних.

4. Побудова таблиці: Трансформація правил у формат векторів $\bar{R}$ та $\bar{E}$.

2.3.4 Експериментальний метод

Цей метод передбачає почергову зміну вхідних значень безпосередньо на реальному фізичному пристрої з вимірюванням фактичних змін вихідних значень. Алгоритм даного методу має наступний вигляд:

1. Підготовка стенду: забезпечення можливості контрольованої зміни кожного компонента вхідного вектору $\bar{X}$ на реальному пристрої та вимірювання всіх компонентів вихідного вектора Y .
2. Послідовне варіювання параметрів: для кожного параметра x_i по чергово встановлюються відхилення від номінального значення з фіксацією відповідних змін вихідного вектору $\bar{Y}$.
3. Визначення напрямків відхилень: на основі отриманих вимірювань визначаються вектори $\bar{R}$ та відповідні вектори $\bar{E}$.
4. Побудова таблиці: формування таблиці відповідності на основі зібраних експериментальних даних.

Даний метод враховує всі властивості реального електронного обладнання, включаючи паразитні елементи, нелінійності та температурні залежності, що забезпечує максимальну точність результатів для конкретного екземпляра пристрою. Водночас він вимагає значних часових і матеріальних ресурсів, обмежений ситуаціями, які фізично можливо відтворити, може бути занадто прив'язаним до конкретного екземпляра схеми, має високий ризик пошкодження пристрою при моделюванні граничних умов, а також складно автоматизується і відтворюється.

2.3.5 Гібридний підхід до генерації таблиць

На практиці рекомендується комбінувати описані методи:

1. Початкова генерація: Використання аналітичного виводу (для простих пристроїв) або систематичного моделювання (для складних).
2. Валідація: Перевірка отриманих правил за допомогою експертних знань.
3. Уточнення: Корекція таблиць на основі реальних експлуатаційних даних.

2.3.6 Порівняльний аналіз запропонованих методів генерації таблиці відповідності

Для обґрунтованого вибору методу генерації таблиці відповідності для конкретного пристрою доцільно порівняти за ключовими критеріями три основні практичні підходи: експертний, експериментальний та математичне моделювання.

Експертний метод є найшвидшим у використанні, не вимагає додаткового

обладнання чи навичок програмування, але схильний до впливу людського фактору, може бути занадто складним при аналізі комплексних змін входів, результат підходу складно довести без експерименту чи моделювання та з таким підходом може бути складно врахувати неідеальну поведінку реального електронного обладнання з паразитними елементами і нелінійностями. Для більш складних схем він обмежується поточним станом знань у відповідній сфері, а також цей підхід неможливо автоматизувати.

Експериментальний метод враховує всі властивості реального електронного обладнання, включаючи паразитні елементи і нелінійності, а також температурні залежності, може врахувати неочікувані залежності і поведінки, результати даного методу є максимально точними для конкретного обладнання, що досліджується. Водночас він вимагає багато часу і ресурсів, обмежений ситуаціями, які фізично можливо відтворити, через особливості конкретної схеми може бути занадто прив'язаним до неї, через що його неможливо використовувати до інших подібних схем, а також схильний до помилок у випадку дефектів конкретного електронного пристрою, який використовується для експериментів, має високий ризик пошкодження пристрою, складно автоматизується і відтворюється.

Метод математичного моделювання є гнучким, може бути повністю автоматизованим за допомогою програмного забезпечення, дозволяє швидко перевірку багатьох конфігурацій і сценаріїв, надає відтворювані і прогнозовані результати, може бути швидко переробленим під інші конфігурації з мінімальними зусиллями, дозволяє легко візуалізувати залежності між входами і виходами, є безпечним для фізичних пристроїв, дозволяє легко протестувати крайові випадки, а також розроблена програмним шляхом математична схема може бути перевикористана в подальшому для реалізації алгоритму. Водночас він вимагає точної моделі, ігнорує частину реальних паразитних параметрів, вимагає спеціалізованого програмного забезпечення і вміння роботи з ним, а також модель все рівно має бути підтвердженою шляхом порівняння поведінки з реальним екземпляром пристрою.

Метод аналітичного виводу, описаний вище, є окремим випадком, який

застосовується переважно до простих лінійних схем і може розглядатися як аналітична альтернатива математичному моделюванню. Для складних нелінійних пристроїв він, як правило, є недостатнім і потребує доповнення одним із трьох зазначених практичних методів.

Вибір конкретного методу для об'єкта діагностування даної роботи обґрунтовано в наступному підрозділі.

2.4 Програмна реалізація методу для перетворювача постійного струму, що знижує напругу

Для практичної верифікації запропонованого методу було обрано понижуючий (buck) перетворювач постійного струму як об'єкт діагностування. Цей тип перетворювача є одним із найбільш поширених у силовій електроніці та характеризується нелінійною поведінкою, що робить його репрезентативним прикладом для апробації діагностичного методу. У даному підрозділі описано створення математичної моделі перетворювача з урахуванням паразитних параметрів, процес визначення яких описано в розділі 3, а також збір та аналіз експериментальних даних для калібрування порогових значень методу. Аналіз результатів використання даного методу для цього перетворювача наведено в розділі 5.

З методів генерації таблиць відповідності, розглянутих у підрозділі 2.3, для даного перетворювача було обрано метод моделювання через його простоту у порівнянні з експериментальним методом, але при цьому потенційно високу точність, необхідність візуалізації для побудови рисунків, а також через плани подальшого використання отриманої моделі в програмному забезпеченні, що детектує дефекти автоматично в ході експлуатації системи.

Створена модель слугує для двох цілей одночасно: створення таблиці відповідності та отримання вектору $\bar{Y}_{DT}$ в ході використання системи, що реалізує даний метод. При цьому метод є агностичним до технології моделювання. Вибір PySpice/Ngspice у даній роботі обумовлений вимогами точності відтворення комутаційних процесів та паразитних ефектів, але для застосувань з обмеженнями на

обчислювальні ресурси модель може бути замінена будь-якою альтернативою, що відтворює компоненти вектору $\bar{Y}$: від аналітичних виразів до сурогатних моделей.

Узагальнену схему застосування методу до перетворювача наведено на рисунку 2.9. Вектор вхідних параметрів $\bar{X}$ одночасно надходить до фізичного об'єкта та цифрового об'єкта. Виміряний вектор $\bar{Y}_{meas}$ і розрахований $\bar{Y}_{DT}$ використовуються для обчислення нормалізованої різниці $\Delta\tilde{Y}_{meas,DT}$ та пошуку в таблиці відповідності. Ідентифікація паразитних параметрів (розділ 3) виконується одноразово на етапі калібрування моделі, а результат діагностування слугує підставою для рішення оператора або системи щодо планового втручання.

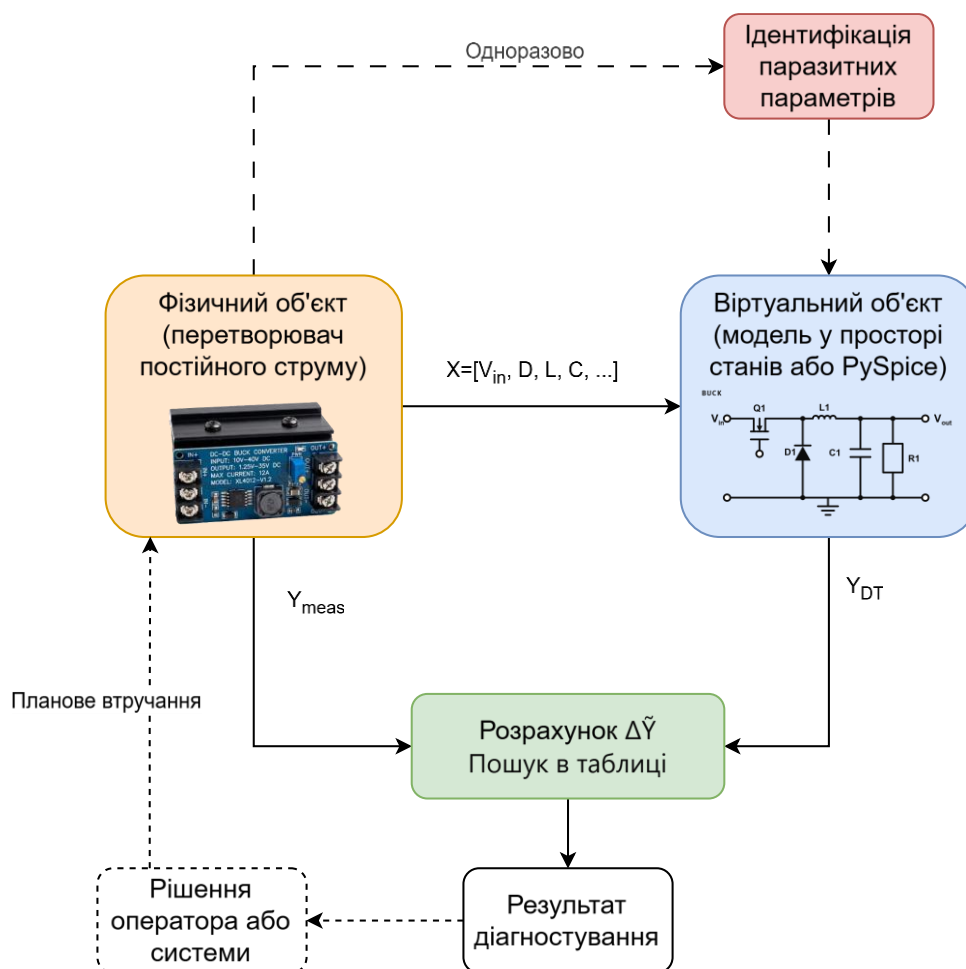


Рис. 2.9. узагальнена схема діагностування перетворювача постійного струму на основі цифрового двійника

Отже, постає необхідність у створенні такої математичної моделі, що буде легко інтегруватися в програмне забезпечення. В якості технології було обрано

PySpice, яка являє собою бібліотеку мовою Python, яка реалізує інтерфейс до симуляторів електричних кіл Ngspice та Xyce на вибір. В розробленій моделі використано Ngspice. Перевагою обраної технології є точність, але вона жертвує швидкістю.

Перетворювач постійного струму, що знижує напругу, який аналізувався в даній роботі, показано на рисунку 2.10. Зображена схема є ідеальною, та ігнорує паразитні параметри, які мають свій вплив на залежність вихідних значень схеми від вхідних. Наявність паразитних параметрів в моделі дозволяє наблизити поведінку моделі до поведінки реального електронного пристрою. Під час попередніх експериментів з даною моделлю та порівняння її з експериментальним макетом перетворювача було виявлено, що така модель (без паразитних параметрів) у PySpice (Ngspice) недостатньо точно відображає поведінку реального обладнання і не підходить для реальних застосувань.

Модель має включати паразитні параметри, такі як: опір котушки індуктивності (DCR) R_L , еквівалентний послідовний опір конденсатора (ESR) R_C , паразитна індуктивність конденсатора L_C , тощо (рис. 2.11).

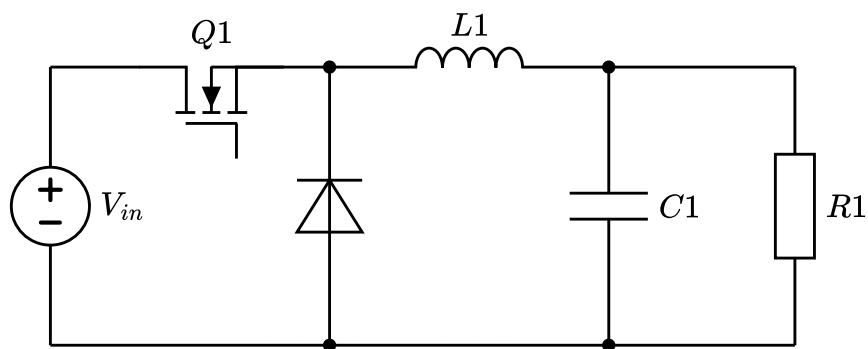


Рис. 2.10. Ідеальна схема понижуючого перетворювача напруги

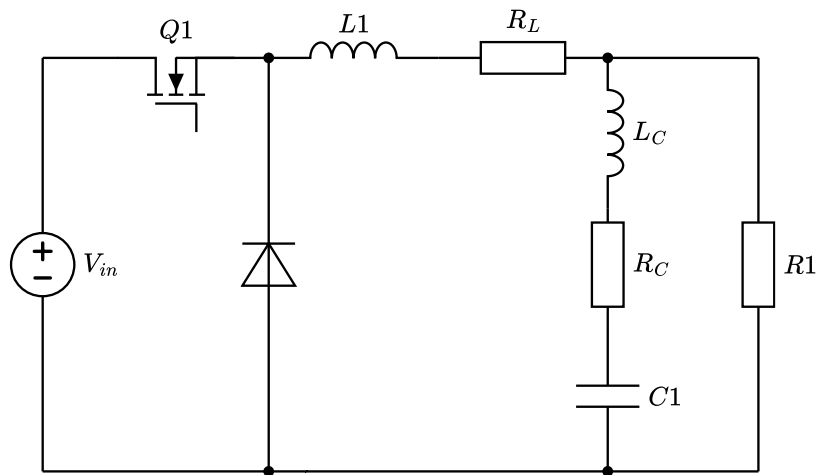


Рис.2.11. Схема перетворювача напруги з урахуванням паразитних компонентів

На рисунку 2.11 зображено схему, що включає в себе паразитні параметри для підвищення точності моделі. Отже, модель має наступні параметри: вхідна напруга V_{in} , коефіцієнт заповнення сигналу ШІМ D , індуктивність котушки L , ємність конденсатора C , опір навантаження R_{load} , опір конденсатора R_C , опір котушки R_L , опір діода R_D , опір відкритого транзистора $R_{DS\ ON}$.

Порогові значення θ для чотирьох показників було отримано на основі калібрування цифрового двійника на наборі даних з 20700 вимірювань у номінальному робочому режимі ($V_{in}=12$ В, $D=50\%$, $C=44$ мкФ, $R=4$ Ом). Спочатку були використані значення θ , що відповідали максимальним по модулю відхиленням поведінки реального пристрою від математичної моделі, отриманим під час перевірки коректності поведінки моделі з ідентифікованими паразитними параметрами (що описано в розділі 3.2). Далі експериментальним шляхом було уточнено більш оптимальні значення. Таким чином, калібрування цифрового двійника за критерієм рівновіддаленості дає не лише узгоджену з екземпляром модель, а й безпосередньо початкове наближення діагностичних порогів, яке далі уточнюється в межах того самого порядку величини, без повторного калібрування моделі. Отримані значення зображені в таблиці 2.4:

Значення θ для кожного з чотирьох показників

Показник	θ
Середня напруга	5.0
Пульсація напруги	56.5
Середній струм	8.5
Пульсація струму	38.0

2.5 Побудова таблиці відповідності для понижуючого перетворювача

На основі розробленої програмної моделі та визначених порогових значень θ , у цьому підрозділі описано процедуру систематичної побудови таблиці відповідності для понижуючого перетворювача. Процедура реалізує метод систематичного моделювання (підрозділ 2.3) шляхом послідовного варіювання кожного вхідного параметра з фіксацією впливу на вихідні характеристики.

Створення таблиці відповідності методу. Всі характеристики компонентів схеми перетворювача, включаючи паразитні, являються вхідними значеннями схеми з точки зору методу. Деякі з характеристик закладаються на етапі проєктування і не є змінними під час експлуатації пристрою. А деякі з них, наприклад шпаруватість сигналу ШІМ, легко піддаються зміні. В даній роботі не аналізується f_{PWM} як вхідне значення через нетривіальність порівняння результатів симуляцій двох моделей, значення f_{PWM} яких сильно відрізняється.

Таким чином, вектор вхідних значень має наступний вигляд:

$$\bar{X} = [V_{in}, D, L, C, R_{load}, R_C, R_L R_D, R_{DS\ ON}].$$

Вихідними ж значеннями слугують середні та амплітудні значення напруги на навантаженні та струму через котушку індуктивності: $\bar{Y} = [V_{out\ mean}, V_{out\ pulse}, I_L\ mean, I_L\ pulse]$, де $V_{out\ mean}$ це середня напруга на навантаженні, $V_{out\ pulse}$ це різниця між максимальним і мінімальним значенням напруги на навантаженні за період у Вольтах, $I_L\ mean$ це середнє значення струму через індуктивність, а $I_L\ pulse$ – різниця між максимальним і мінімальним значенням струму

через індуктивність за період в амперах.

Важливо зазначити, що оскільки в понижуючому перетворювачі формула пульсацій струму через індуктивність має вигляд $\Delta I_L = \frac{(V_{in} - V_{out}) \times D \times T}{L} = \frac{V_{in} \times (1 - D) \times D \times T}{L}$, де T це період комутації, а формула пульсацій напруги навантаження має вигляд $\Delta V_{out} = \frac{T \times \Delta I_L}{8C} = \frac{V_{in} \times (1 - D) \times D \times T^2}{8LC}$, то можна бачити, що обидві формули мають множник $(1 - D) \times D$, який приймає максимальне значення при $D = 0.5$, отже при цьому значенні пульсації струму і напруги максимальні. Іншими словами, для формування таблички відповідності та діагностики пристрою доцільно використовувати $D = 0.5$, бо інакше стає складніше визначити, як саме на амплітуду пульсацій могла би вплинути некоректно працююча схема генерації ШІМ сигналу (наприклад, зниження D з 0.7 до 0.6 мало такий самий вплив на амплітуди пульсацій, як і збільшення D з 0.3 до 0.4).

Процес побудови таблиці відповідності, а також сама отримана в результаті таблиця наведені в додатку Б. Результати експериментального тестування методу та таблички відповідності наведено в розділі 5.

2.6 Висновки до розділу 2

У даному розділі розроблено новий інтегрований метод онлайн-діагностування напівпровідникових перетворювачів електроенергії на основі цифрового двійника, що забезпечує виявлення та локалізацію причин відмов за аналізом відхилень вихідних сигналів, та виконано його програмну реалізацію для понижуючого перетворювача постійного струму. Інтегрований характер методу полягає в тому, що він, на відміну від існуючих, поєднує в єдиній процедурі калібрування цифрового двійника під конкретний екземпляр пристрою (розділ 3), векторне порівняння зовнішніх сигналів працюючого перетворювача з еталонними даними двійника та таблицю відповідності між векторною різницею і ступенем несправності (деградації) елементів, що дозволяє локалізувати причину відмови без вимірювань параметрів окремих елементів.

Основні результати розділу:

1. Розроблено математичний апарат методу, що базується на векторному представленні вхідних і вихідних параметрів електронного пристрою та нормалізованому порівнянні з еталонними значеннями цифрового двійника, відкаліброваного під конкретний екземпляр пристрою (розділ 3). Введено механізм «сірої зони» з індивідуальними пороговими значеннями для кожного компонента вихідного вектору, що забезпечує стійкість діагностики до шумів вимірювань і неідеальностей математичної моделі.
2. Формалізовано діагностичний алгоритм на основі таблиці відповідності векторів напрямків відхилень $\bar{R}$ до векторів причин $\bar{E}$. Запропоновано розширений формат вектора $\bar{E}$ з множинними ступенями впливу, що дозволяє розрізняти різні масштаби деградації параметрів пристрою без суттєвого ускладнення алгоритму.
3. Систематизовано чотири методи генерації таблиць відповідності (систематичне моделювання, аналітичний вивід, формалізація експертних знань, експериментальний метод) та запропоновано гібридний підхід для їх комбінування. Виконано порівняльний аналіз цих методів за критеріями точності, автоматизуємості, масштабованості та вимог до ресурсів.
4. Реалізовано програмну модель понижуючого перетворювача постійного струму у середовищі PySpice (Ngspice) з урахуванням паразитних параметрів. На основі 20700 вимірювань з реального перетворювача визначено порогові значення θ для чотирьох вихідних показників. Використано значення паразитних параметрів, визначення яких описано в розділі 3, що підвищує точність діагностики.
5. Побудовано таблицю відповідності для понижуючого перетворювача, що містить 19 рядків і покриває 9 вхідних параметрів з $K = 3$ ступенями зміни кожного. Візуалізація впливів у вигляді теплових карт підтвердила фізичну коректність отриманих залежностей.

Важливо зазначити, що отримувана методом оцінка ступеня деградації компонента є не лише діагностичною, а й потенційно прогностичною ознакою: відстеження її динаміки в часі (дрейф вектору у просторі) у перспективі дозволяє

оцінювати залишковий ресурс компонента та виявляти передвідмовні стани. У цій роботі аналіз трендів окремо не розглядався і становить напрям подальших досліджень. Крім того, побудована в розділі таблиця відповідності охоплює обмежений набір параметрів та ступенів їх зміни. Тому другим напрямом подальших досліджень є розширення словника несправностей таблиці та кількісне оцінювання його повноти.

Основні результати розділу опубліковано в працях [149, 151]

РОЗДІЛ 3. Калібрування цифрового двійника та інформаційна технологія діагностування відмов

3.1 Вибір алгоритму ідентифікації паразитних параметрів силового перетворювача

На сучасному етапі розвитку силової електроніки відбувається перехід до високих частот комутації, що дозволяє суттєво зменшити масогабаритні показники пасивних компонентів. Однак, при підвищенні частоти більш важливого значення набувають паразитні параметри схеми такі як послідовний опір конденсатора, паразитна індуктивність конденсатора, опір каналу транзистора в режимі проведення струму, часи наростання та спаду струму через затвор, параметри діода тощо. До того ж, номінальні значення основних елементів схеми можуть бути визначені безпосередньо з паспортних даних компонентів (якщо не брати до уваги брак та відхилення), тоді як паразитні параметри у документації, як правило, не наводяться або наводяться з недостатньою точністю. Також деякі з паразитних параметрів зумовлені дизайном друкованої плати, тому дані про їх значення апріорі не можуть міститися в документаціях на компоненти. Разом з тим, саме паразитні параметри у великій мірі визначають поведінку схеми в перехідних режимах, форму пульсацій струму та напруги, а також є основними чинниками, відповідальними за розходження між ідеалізованою моделлю і реальним пристроєм. Таким чином, задача ідентифікації паразитних параметрів за результатами вимірювань є ключовим етапом формування цифрового двійника, що підходить для діагностики електронного обладнання. Оптимізація таких систем перетворюється на багатофакторну задачу, де цільова функція має складний нелінійний «рельєф» з багатьма локальними екстремумами.

З точки зору математики, ідентифікація зводиться до задачі оптимізації: необхідно знайти вектор параметрів $\bar{X} = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ такий, що цільова функція $F(X)$, яка вимірює відхилення між виходами моделі та реального пристрою, набуває мінімального значення:

$$F(\bar{X}) = \sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^P w_i \cdot |y_{model,k}(t_i, \bar{X}) - y_{real,k}(t_i)|^2 \rightarrow \min, \quad (3.1)$$

де M – кількість вимірюваних вихідних величин (напруга, струм тощо); P – кількість відліків кожного сигналу у часі; $y_{model,k}(t_i, X)$ – виміряні значення k -ї величини математичної моделі зі встановленими параметрами X , в конкретний момент часу t_i i -го заміру; $y_{real,k}(t_i)$ – відповідно, виміряні значення фізичного пристрою, w_i – вагові коефіцієнти, що відображають пріоритетність окремих величин.

Простір пошуку параметрів є багатовимірним та, як правило, нелінійним, оскільки паразитні параметри охоплюють кілька порядків величин (від пікоФарад і пікоГенрі до міліОм і наносекунд), а цільова функція може мати численні локальні мінімуми внаслідок нелінійності диференціальних рівнянь стану перетворювача. За таких умов вибір методу оптимізації є принциповим для забезпечення достовірності ідентифікації.

Як було продемонстровано в підрозділі 1.2.4, у сучасній літературі з ідентифікації параметрів силових перетворювачів та суміжних задач оптимізації в силовій електроніці виділяється кілька класів методів: градієнтні методи, еволюційні алгоритми (зокрема генетичні алгоритми), метод рою частинок (Particle Swarm Optimization, PSO) та алгоритм сірого вовка (Grey Wolf Optimizer, GWO). Далі подається огляд принципів роботи кожного з них із вказівкою на ключові переваги та обмеження стосовно задачі, що розв'язується.

Градієнтні методи оптимізації.

Градієнтні методи є класичним інструментом нелінійної оптимізації і базуються на використанні інформації про часткові похідні цільової функції для визначення напрямку руху в просторі параметрів. У найбільш загальному формулюванні ітераційне оновлення вектору параметрів при використанні метода градієнтного спуску здійснюється за наступним правилом:

$$\bar{X}(t + 1) = \bar{X}(t) - \alpha \cdot \nabla F(\bar{X}(t)), \quad (3.2)$$

де $\alpha > 0$ – швидкість/крок навчання (learning rate), $\nabla F(\bar{X}(t))$ – градієнт цільової функції по вектору параметрів.

Однак застосування градієнтних методів до задачі ідентифікації паразитних параметрів перетворювача постійного струму нашою є на недоліки даного класу методів. По-перше, для обчислення градієнта ∇F необхідна диференційованість цільової функції по кожному з параметрів, тоді як симуляційні моделі перетворювача (зокрема реалізовані в PySpice або SPICE-подібних середовищах) є частково недиференційованими через перемикаючу природу транзистора та діода. По-друге, поверхня цільової функції у просторі паразитних параметрів має багато локальних екстремумів, а отже градієнтний спуск із будь-якої початкової точки з високою імовірністю збігається до локального, а не глобального мінімуму. По-третє, суттєво різні масштаби параметрів (наприклад, ESR конденсатора в діапазоні 1 мОм - 0.5 Ом та часи перемикання 0.1-100 нс) ускладнюють вибірку кроку навчання та призводять до нестійкості ітераційного процесу без ускладнення у вигляді нормування. В-четверте, при використанні симуляційних моделей виникає проблема з отриманням часткових похідних по кожному параметру, оскільки виникає потреба або в чисельному диференціюванні шляхом запуску великої кількості симуляцій (що затратно в термінах ресурсів та часу), або сурогатного моделювання шляхом збору великого набору даних поведінки моделі, навчання нейронної мережі на ньому та подальшого диференціювання даної нейронної мережі з використанням зворотного розповсюдження помилки, що також є затратним процесом.

Метод оптимізації рою частинок.

Даний метод відноситься до класу метаевристичних алгоритмів, які були натхнені колективною поведінкою біологічних систем. Алгоритм оперує популяцією частинок (агентів), кожна з яких представляє точку в просторі пошуку та рухається відповідно до правил оновлення швидкості та положення:

$$\bar{V}(t+1) = w \cdot \bar{V}(t) + c_1 r_1 \cdot (p_{best} - \bar{X}(t)) + c_2 r_2 \cdot (g_{best} - \bar{X}(t)), \quad (3.3)$$

$$\bar{X}(t+1) = \bar{X}(t) + \bar{V}(t+1), \quad (3.4)$$

де $\bar{V}(t)$ та $\bar{X}(t)$ – вектори швидкості та положення частинки на ітерації t відповідно; w – коефіцієнт інерції, що регулює баланс між глобальним та локальним

пошуком (оскільки змушує частинку «пролітати» повз локальні екстремуми по інерції; c_1 та c_2 – когнітивний (власний) і соціальний (спільний) коефіцієнти прискорення; $r_1, r_2 \in [0, 1]$ – випадкові числа; p_{best} – найкраще положення, знайдене даною частинкою за весь час руху; g_{best} – глобально найкраще положення серед усіх частинок рою.

Ініціалізується алгоритм шляхом генерації частинок з випадковими параметрами та швидкостями по всьому простору пошуку. Для кожної частинки рахується її функція втрат. Якщо поточне положення частинки краще за її особистий рекорд, то p_{best} оновлюється. Якщо поточне положення краще за глобальний рекорд, то оновлюється ще й g_{best} . Далі рахується нова швидкість і частинки рухаються. Даний алгоритм повторюється циклічно допоки не досягається потрібна точність або ліміт операцій. Оскільки формула містить складові $(p_{best} - \bar{X}(t))$ та $(g_{best} - \bar{X}(t))$, то кожен частинку «притягує» в бік відомої їй особисто та глобально відомої найкращої точки. Але наявність інерції w дещо знижує ризик застрягання в локальних екстремумах.

Метод оптимізації рою частинок активно застосовується в задачах оптимізації параметрів перетворювачів постійного струму. Він має високу швидкість збіжності, а також не потребує великої кількості пам'яті та ресурсів. Разом з тим, йому притаманні певні обмеження у багатовимірних задачах з параметрами, що мають суттєво різні масштаби. Відсутність явного механізму рекомбінації між різними перспективними регіонами простору пошуку (на відміну від генетичних алгоритмів) знижує різноманіття рою з часом і може призводити до передчасної збіжності в локальному мінімумі. Крім того, налаштування гіперпараметрів w, c_1, c_2 є чутливим до специфіки задачі і суттєво впливає на якість результату.

Алгоритм сірого вовка.

Алгоритм сірого вовка, запропонований в роботі [121] в 2014 році, моделює ієрархічну поведінку зграї вовків у процесі полювання. Ієрархія включає чотири рівні: α (найкращий розв'язок), β (другий кращий), δ (третій кращий) та ω (решта популяції). Тобто аналогія з альфа, бета, дельта та омега представниками зграї. Під час

полювання вовки змінюють своє положення в просторі пошуку, орієнтуючись на розташування цілі. Математично це виражається наступним чином:

$$D_i = |C_i \cdot \bar{X}_p(t) - \bar{X}_i(t)|, \quad (3.5)$$

$$\bar{X}_i(t+1) = \bar{X}_p(t) - A_i \cdot D_i, \quad (3.6)$$

$$A_i = 2a \cdot r_1 - a, \quad (3.7)$$

$$C_i = 2 \cdot r_2, \quad (3.8)$$

де t це номер ітерації; $\bar{X}_p$ це вектор розташування жертви (найкращого рішення); $\bar{X}$ – вектор положення вовка; A і C – коефіцієнти, що визначають баланс між «розбіганням» зграї та атакою в одну точку; a – коефіцієнт, що лінійно зменшується від 2 до 0 з кожною ітерацією; r_1 та r_2 це випадкові числа з діапазону $[0,1]$.

Але, вочевидь, справжнє розташування жертви (апроксимованого оптимуму) не відоме, бо інакше не було б потреби у самій оптимізації. Це є абстрактним оптимумом, який вовки «відчувають», але не знають, де саме він є. В реальному алгоритмі жертва не є відомою, тому її апроксимують за допомогою α , β і δ . Всі оновлюють своє положення відповідно до положень α -, β - та δ -вовків за правилом:

$$\bar{X}(t+1) = \frac{\bar{X}_1 + \bar{X}_2 + \bar{X}_3}{3}, \quad (3.9)$$

де $\bar{X}_1$, $\bar{X}_2$, $\bar{X}_3$ це цільові положення, визначені на основі положень α -, β - та δ -вовків відповідно. Підставляючи $\bar{X}_\alpha^*$, $\bar{X}_\beta^*$, $\bar{X}_\delta^*$ замість $\bar{X}_p$, отримуємо:

$$\bar{X}_j = \bar{X}_j^* - A_j \cdot |C_j \cdot \bar{X}_j^* - \bar{X}(t)|, \quad j \in \{1, 2, 3\}, \quad (3.10)$$

де $\bar{X}_j^*$ це поточне положення провідного вовка рівня j .

Поступове зменшення a від 2 до 0 дозволяє розділити полювання на три фази, які відповідають поведінці вовків у природі. **Фаза пошуку** характеризується великими значеннями a (близькими до 2). Вовки розбігаються, можуть «перестрибувати» через лідерів. **Фаза оточення** починається в середині, коли a стає

близьким до 1, коли вовк починає більше робити кроки в сторону цілі. Завершаюча **фаза атаки** характеризується зниженням a ближче до 0, тоді вся зграя концентрується навколо лідерів і перестає досліджувати (переходить до режиму уточнення).

Алгоритм сірого вовка демонструє конкурентноспроможні результати в задачах оптимізації параметрів перетворювачів постійного струму [122]. Його перевагою є простота налаштування (лише параметр a потребує визначення) та відносно швидка збіжність для задач малої й середньої розмірності. Водночас, функція помилки в силовій електроніці може мати велику кількість локальних мінімумів через нелінійності ключових елементів та шумів вимірювання, а методи, які базуються на «ройових» підходах, швидко втрачають різноманітність і тому схильні до передчасної збіжності. Також, даний алгоритм дуже чутливий до початкової популяції, бо якщо його початкова зграя розташована далеко від реальних фізичних значень, лідери можуть повести всю зграю в неправильному напрямку, оскільки рух всіх агентів диктується виключно трьома кращими рішеннями на поточній ітерації.

Генетичні алгоритми.

Генетичні алгоритми є еволюційними метаевристиками, що моделюють процес природного відбору. Кожен індивід популяції називається хромосомою, що кодує потенційний розв'язок задачі, який фактично являє собою вектор:

$$\bar{G} = [g_1, g_2, \dots, g_n], \quad (3.11)$$

де g_i – це «гени» (біти або числа). Іноді в таких алгоритмах є чітке розділення між **генотипом** (цифровим представленням, закодованим у вигляді генів g_i) та **фенотипом** (фізичними параметрами, такими як опори, ємності тощо). При цьому $g_i \in [0,1]$. В ході виконання алгоритму над генотипом, в моменти, коли алгоритм потребує фізичні значення (наприклад для запуску симуляції), відбувається процес декодування (переходу до фенотипу). Такий підхід дозволяє одночасно поєднувати в одному алгоритмі роботу як з лінійними масштабами, так і логарифмічними, при цьому завжди зберігати діапазон $g_i \in [0,1]$. В кінці виконання алгоритму також відбувається процес декодування, що ставить кожному $\bar{G}_i = [g_{i,1}, g_{i,2}, \dots, g_{i,n}]$ у

відповідність його $\bar{X}_i = [x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,n}]$, використовуючи кожному відповідному гену його функцію декодування (враховуючи масштаб).

Загальною задачею алгоритму є знайти такий $\bar{G}^*$, при якому функція пристосованості набуває мінімального значення, тобто:

$$f(\bar{G}^*) = \min f(\bar{G}) \quad (3.12)$$

Стандартний ітераційний цикл генетичного алгоритму включає три оператори: селекцію, кросовер та мутацію, але часто додається ще й метод елітизму.

Оператор **селекції** формує батьківську пару з популяції пропорційно до значення функції пристосованості. Одним із поширених механізмів є турнірна селекція, при якій з популяції випадково вибирається k індивідів і в якості батька обирається той, що має найвище значення функції пристосованості. Іншим популярним механізмом є метод рулетки, який полягає у тому, що шанс вибору конкретного індивіда є пропорційним до значення функції пристосованості:

$$P_i = \frac{f(\bar{G}_i)}{\sum_{j=1}^N f(\bar{G}_j)}, \quad (3.13)$$

де P_i це ймовірність вибору конкретного індивіду i .

Наступним етапом є **кросовер**. В багатьох реалізаціях генетичних алгоритмів вводиться гіперпараметр P_c , а також обирається випадкове число в діапазоні $[0,1]$ так, що якщо випадкове число виявляється більшим за параметр P_c , то операцію кросоверу як така пропускається, а обрані на етапі селекції батьки переходять безпосередньо без змін у наступне покоління. Якщо ж випадкове число менше за P_c , то на даному етапі ставиться ціль скомбінувати «гарні гени» обох батьків в одному ефективному рішенні. Кросовер між батьківськими хромосомами $\bar{G}_1$ та $\bar{G}_2$ відбувається в точці розриву j :

$$\bar{G}_{child} = [\bar{G}_1[1 \dots j], \bar{G}_2[j + 1 \dots n]], \quad (3.14)$$

де n це довжина хромосоми (кількість параметрів).

Третім етапом є **мутація**. Даний етап слугує задля забезпечення різноманітності

популяції та уникнення передчасної збіжності до локальних оптимумів. Кожен ген нового нащадка з низькою ймовірністю (зазвичай близько 0.001...0.05), що визначається гіперпараметром P_m , піддається випадковій зміні. Нова популяція формується з нащадків шляхом відбору особин, що мають найвищі значення функції пристосування.

В деяких реалізаціях даного класу алгоритмів застосовують також метод **елітизму**, який полягає в тому, що певний відсоток найкращих індивідів з даного покоління гарантовано і без змін копіюється в наступне. Це гарантує, що алгоритм не втратить найкраще знайдене рішення через невдалу випадкову мутацію.

Для задачі ідентифікації паразитних параметрів перетворювачів постійного струму, кожен ген хромосоми відповідає одному з параметрів, які оптимізуються. Оскільки параметри охоплюють кілька порядків величин (наприклад, паразитна індуктивність конденсатора – від 1 пГн до 100 нГн, ESR конденсатора – від 1 мОм до 0.5 Ом), доцільним є застосування логарифмічного кодування генів $g \in [0,1]$ в фактичні значення параметрів за наступною формулою:

$$x_i = x_{i,min} \cdot \frac{x_{i,max}^g}{x_{i,min}}, \quad (3.15)$$

що забезпечує рівномірне дослідження параметричного простору незалежно від масштабу конкретного параметра. Параметри, що мають лінійний діапазон зміни, декодуються без логарифмування:

$$x_i = x_{i,min} + g \cdot (x_{i,max} - x_{i,min}). \quad (3.16)$$

Вибір алгоритму та обґрунтування.

Порівняльний аналіз розглянутих методів оптимізації стосовно задачі ідентифікації паразитних параметрів моделі перетворювача постійного струму дозволяє обрати генетичний алгоритм як основний метод для цілей даного дослідження.

По-перше, задача ідентифікації паразитних параметрів є задачею глобальної оптимізації з мультимодальною поверхнею цільової функції. Градієнтні методи непридатні для її розв'язання без додаткових механізмів уникнення локальних

мінімумів і потребують диференційованості цільової функції. Але умова не виконується для SPICE-подібних симуляційних моделей перетворювача. По-друге, генетичні алгоритми, на відміну від інших розглянутих, використовують явний оператор кросоверу, що забезпечує обмін інформацією між різними перспективними регіонами простору пошуку та підтримує різноманіття популяції протягом усього процесу оптимізації. Це особливо важливо для задачі з семи параметрами (які будуть використані в даній роботі), що охоплюють суттєво різні масштаби, де інші алгоритми схильні до передчасної збіжності. По-третє, логарифмічне кодування генів, природно інтегроване в хромосомне представлення генетичного алгоритму, дозволяє ефективно обробляти параметри різних порядків величини. Рівномірне дослідження простору пошуку в логарифмічному масштабі є принциповою перевагою для ідентифікації таких параметрів, як часи наростання затворного струму (0.1...100 нс) та опір каналу транзистора (1 пОм – 1 мОм), різниця між межами яких становить 9 порядків величини. По-четверте, аналіз публікацій показує, що ідентифікація паразитних параметрів для побудови цифрових двійників перетворювачів постійного струму на основі генетичних алгоритмів є малодослідженою областю: переважна більшість робіт або застосовує інші метаевристичні алгоритми (насамперед PSO) для тієї ж задачі ідентифікації, або використовує генетичні алгоритми для принципово інших задач (наприклад, оптимізації керування чи конструкції перетворювачів). Таким чином, застосування генетичного алгоритму для ідентифікації параметрів не лише є методологічно обґрунтованим, але й відповідає актуальній науковій проблемі.

3.2 Метод калібрування цифрового двійника перетворювача постійного струму

Перетворювач постійного струму, який аналізується в даній роботі, показано на рисунку 3.1. Зображена схема є ідеальною та ігнорує паразитні параметри, які мають свій вплив на залежність вихідних значень схеми від вхідних. Наявність паразитних параметрів в моделі дозволяє наблизити поведінку моделі до поведінки реального електронного пристрою. Під час попередніх експериментів з даною моделлю та

порівняння її з експериментальним макетом перетворювача було виявлено, що така модель у PySpice (Ngspice) недостатньо точно відображає поведінку реального обладнання. Ця розбіжність між моделлю і реальним пристроєм призводить до суттєвого зниження точності цифрового двійника. Отже, для кращих результатів модель має включати в себе паразитні параметри, наприклад такі, як: опір котушки індуктивності (DCR) R_L , еквівалентний послідовний опір конденсатора (ESR) R_C , паразитна індуктивність конденсатора L_C тощо (рисунк 3.2). Також слід враховувати неідеальність поведінки електронних компонентів, наприклад затримки на переключення транзистора. Основні параметри експериментального макету перетворювача, а також початкові значення паразитних параметрів, що приймалися на початку дослідження, наведено у таблиці 3.1.

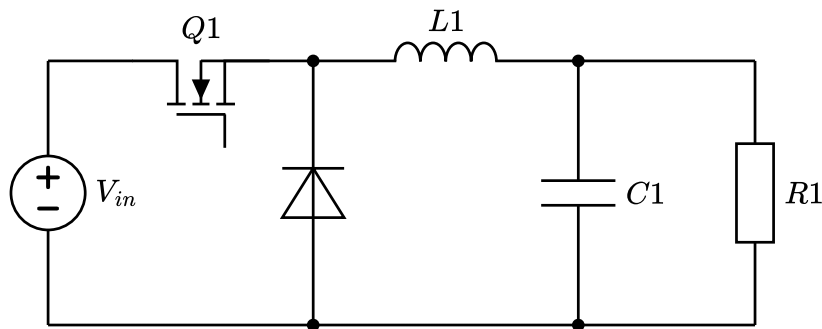


Рис. 3.1. Типова схема понижуючого перетворювача напруги

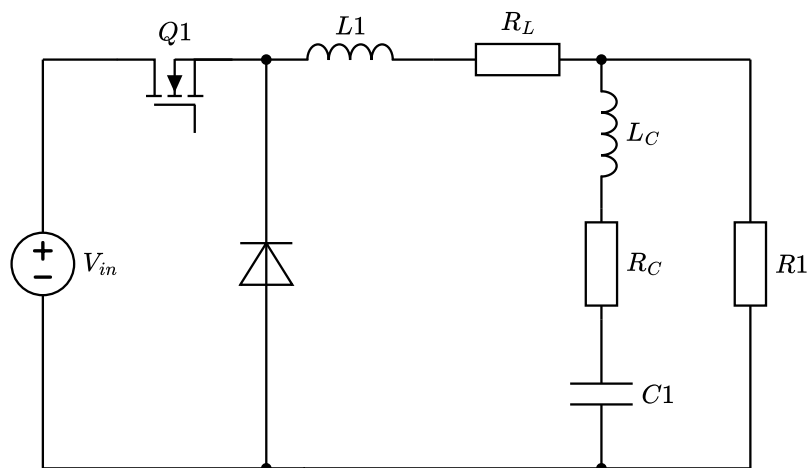


Рис. 3.2. Розширена схема електрична принципова перетворювача з деякими паразитними елементами

Параметри експериментального перетворювача постійного струму, що знижує напругу та початкові значення паразитних параметрів

Параметр	Позначення	Початкове значення
Вхідна напруга, В	V_{in}	12
Частота сигналу ШІМ, кГц	f_{PWM}	312.5
Шпаруватість ШІМ	D	0.5
Індуктивність котушки, мкГн	L	10
Ємність конденсатора, мкФ	C	44
Опір навантаження, Ом	R_1	3.8
Еквівалентний послідовний опір конденсатора, Ом	R_C	0.02
Еквівалентний послідовний опір котушки індуктивності, мОм	R_L	19.5
Опір діода, Ом	R_D	0.05
Опір стік-витік відкритого транзистора, Ом	R_{DSon}	1e-9

У підрозділі 3.1 обґрунтовано вибір генетичного алгоритму та сформульовано задачу ідентифікації паразитних параметрів як задачу глобальної оптимізації. Проте потрібно визначити, відносно якого вимірювання слід калібрувати модель за наявності значного розкиду експериментальних даних, а також пов'язати результат калібрування з подальшим діагностуванням. Тому в роботі запропоновано метод калібрування цифрового двійника, який об'єднує визначення еталонного сигналу, ідентифікацію параметрів та формування початкових порогів діагностування в єдину процедуру (рисунок 3.3).

Вхідними даними методу є: експериментальна вибірка сигналів справного пристрою $S = \{(V_C^k(t), I_L^k(t))\}$, $k = 1 \dots K$; симуляційна модель перетворювача $M(X)$, де $X = (x_1, \dots, x_n)$ – вектор паразитних параметрів, що ідентифікуються; межі $[x_{i,min}; x_{i,max}]$ та тип шкали (логарифмічна або лінійна) для кожного параметра; гіперпараметри генетичного алгоритму: розмір популяції N , кількість поколінь T , кількість елітних хромосом E , вагові коефіцієнти функції пристосованості; допуск симетрії ε . *Вихідними даними* є вектор ідентифікованих параметрів X^* та вектор початкових порогів діагностування θ .

Етап 1. Підготовка експериментальних даних. Шуми та комутаційні викиди спотворюють оцінку пульсацій, а отже й граничні значення вибірки, від яких

залежить вибір еталона.

Крок 1. Виконати фільтрацію сигналів вибірки S для показників з високим рівнем шуму.

Крок 2. Для кожного вимірювання k обчислити вектор показників $Y_k = (V_{\text{Cavg}}, V_{\text{Cripple}}, I_{\text{Lavg}}, I_{\text{Lripple}})$ та визначити мінімальне, максимальне значення і стандартне відхилення кожного показника у вибірці.

Етап 2. Визначення еталонного сигналу. Еталоном обирається реальне вимірювання, а не синтетична точка, що гарантує фізичну сумісність усіх чотирьох його показників.

Крок 3. Для показників із найбільшим відносним розкидом обчислити точку, рівновіддалену від граничних значень вибірки.

Крок 4. Для кожного вимірювання k обчислити нормалізовану відстань d_k до цієї точки як суму відстаней за обраними показниками та обрати еталонне вимірювання $k^* = \operatorname{argmin} d_k$. Вектор показників Y_{k^*} надалі є ціллю калібрування.

Етап 3. Ідентифікація параметрів генетичним алгоритмом.

Крок 5. Сформувати початкову популяцію з N хромосом $G \in [0, 1]^n$: хромосома, що відповідає початковим (довідковим) значенням параметрів, її варіації з відхиленням $\pm 50\%$, решта – випадкові. Прийняти $t = 0$.

Крок 6. Для кожної хромосоми популяції декодувати гени у фізичні значення параметрів, виконати симуляцію моделі $M(X)$, обчислити вектор показників модельованого сигналу та значення функції пристосованості $F(G)$ відносно Y_{k^*} .

Крок 7. Перенести E хромосом із найменшим значенням F до наступного покоління без змін (елітизм).

Крок 8. Доповнити наступне покоління до розміру N нащадками, отриманими послідовним застосуванням турнірної селекції, імітованого бінарного кросоверу та мутації з адаптивною ймовірністю.

Крок 9. Прийняти $t = t + 1$. Якщо $t < T$ – перейти до кроку 6; інакше визначити $G^* = \operatorname{argmin} F(G)$ та декодувати його у вектор X^* .

Етап 4. Верифікація моделі та формування порогів. На цьому етапі результат калібрування перетворюється на вхідні дані методу діагностування.

Крок 10. Для моделі $M(X^*)$ обчислити відносні відхилення δY_k кожного показника від відповідних показників усіх K вимірювань вибірки.

Крок 11. Перевірити симетричність відхилень: $\|\min \delta\| - \|\max \delta\| \leq \varepsilon$ для показників, за якими визначався еталонний сигнал. У разі невиконання умови рекомендується скоригувати вагові коефіцієнти або межі пошуку та повернутися до кроку 5.

Крок 12. Прийняти початкові пороги діагностування $\theta Y = \max(|\min \delta Y|, |\max \delta Y|)$; передати X^* до цифрового двійника, а θ – до методу діагностування (підрозділ 2.4).

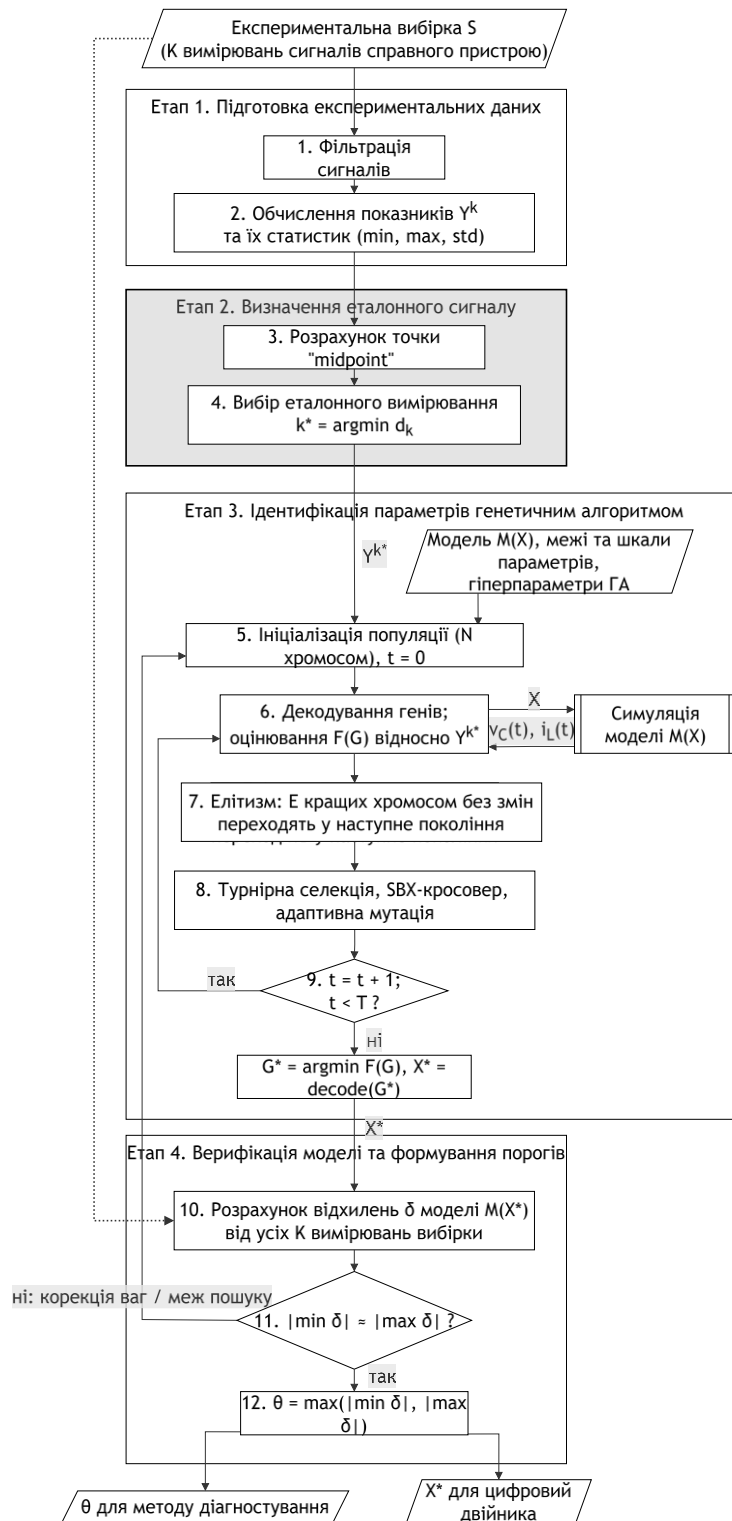


Рисунок 3.3 Схема методу калібрування цифрового двійника перетворювача постійного струму на основі генетичного алгоритму

Основні обчислювальні витрати методу становлять $N \cdot T$ запусків симуляції. Калібрування виконується одноразово в офлайн-режимі і не впливає на швидкодію онлайн-діагностування. Метод не прив'язаний до конкретної топології

перетворювача, оскільки модель $M(X)$ та склад вектора X є його вхідними даними; умовою застосовності є наявність вибірки сигналів завідомо справного пристрою в усталеному режимі. Через стохастичний характер генетичного алгоритму результат може дещо відрізнятися між запусками, а ідентифіковані значення слід розглядати як еквівалентні параметри моделі, що забезпечують узгодження її поведінки з об'єктом, а не як результати вимірювання фізичних величин. Відмінною рисою методу є поєднання етапів 2 та 4: оскільки модель калібрується за вимірюванням, рівновіддаленим від меж вибірки, відхилення відкаліброваної моделі є симетричними і безпосередньо використовуються як пороги діагностування без окремого налаштування додатних та від'ємних значень.

Далі наведено реалізацію етапів методу для експериментального макета перетворювача.

Початковий збір даних

Методика початкового збору даних полягала у наступному. На експериментальному макеті перетворювача (параметри елементів та режим роботи наведено у таблиці 3.1), за допомогою цифрового осцилографа, протягом 4 годин з періодом 2 секунди робилися вибірки даних: напруги на ємності $C1$ (V_C) та напруги на датчику вимірювання струму, яка потім одразу перераховувалася в струм через індуктивність $L1$ (I_L). Дані вибірки зберігалися на сервері для забезпечення до них доступу скриптами обробки. Загалом вибірка налічувала 6705 пар (сигнали напруги та струму) даних.

Попередня обробка даних

На основі цих даних за допомогою мови програмування Python виконувався початковий аналіз поведінки схеми, а саме – пошук середніх значень напруги та струму, пульсацій напруги та струму, статистичні значення щодо діапазонів цих параметрів (наприклад значення найбільшої і найменшої пульсації напруги). Результати цього аналізу також будуть використані для визначення параметрів θ для реалізації методу, що описаний в даній роботі.

Приклад сигналів, які були обрані випадковим чином серед усього набору даних, зображено на рисунку 3.4, де показані два періоди сигналів керування силовим

транзистором. З рисунку видно, що сигнали мають значний шум (що пов'язано з реалізацією перетворювача, який використовується для проведення лабораторних робіт), а також в момент комутації струм має помітні викиди, що пов'язані зі значною паразитною індуктивністю контуру перемикання струму та/або проблемами в схемі вимірювання. Факт використання таких спотворених сигналів в даній роботі лише покращує достовірність отриманих результатів, оскільки підтверджує, що ідеї, запропоновані в роботі, можуть бути повноцінно використані і в неідеальних польових умовах. Також це розширює кількість наукових робіт з тематики діагностики пристроїв силової електроніки, бо, як було показано в підрозділі 1.1.5, досить низька частка робіт включала в себе тестування в польових умовах.

Оскільки показниками, які будуть використовуватися в якості вихідного вектору для методу, що пропонується в даній роботі є середня напруга на виході (вихідному конденсаторі фільтру) V_{Cavg} , пульсації напруги на виході (вихідному конденсаторі фільтру) $V_{Cripple}$, середній струм через індуктивність I_{Lavg} , та пульсації струму через індуктивність $I_{Lripple}$, то доцільно проаналізувати діапазон значень цих показників. Вибірки, відсортовані по рівню від найменшого до найбільшого, показані на рисунку 3.5.

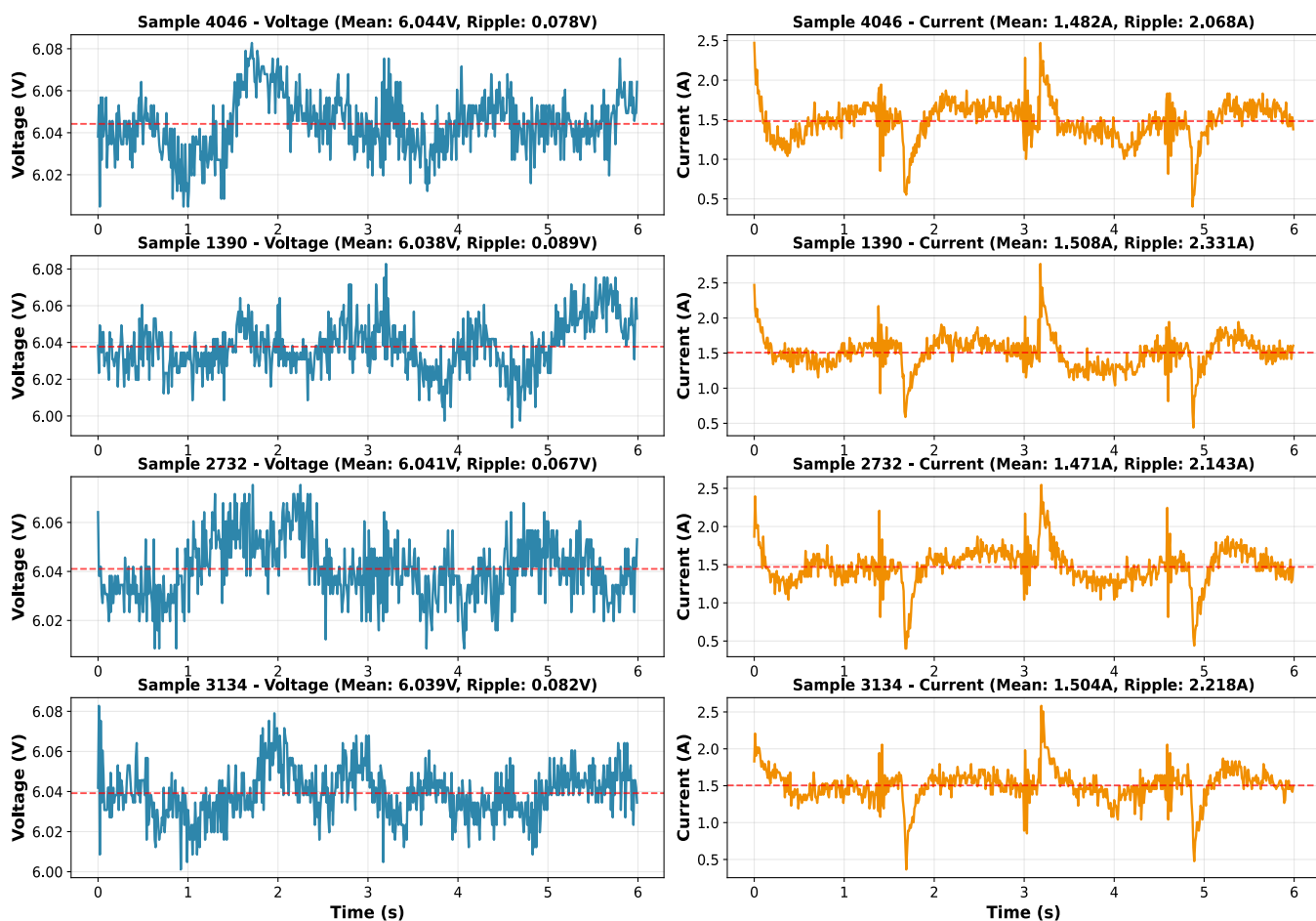


Рис. 3.4. Приклад сигналів з вибірки – напруга V_C та струм I_L

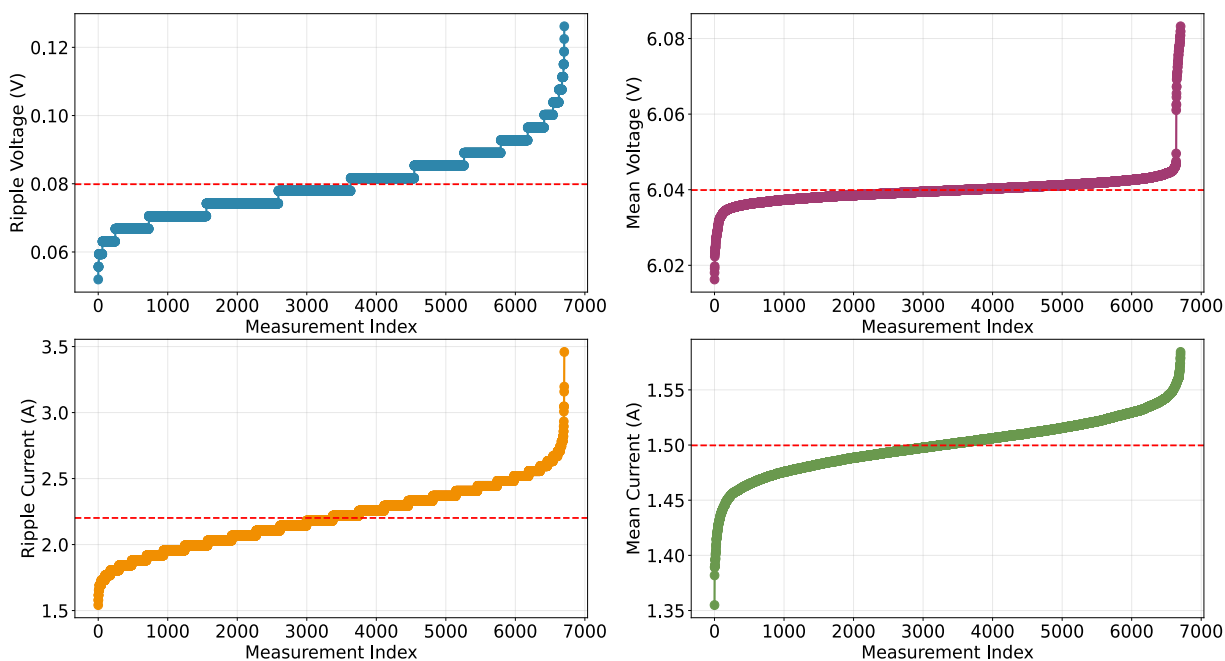


Рис. 3.5. Графічне зображення діапазонів чотирьох показників $V_{Cripple}$, V_{Cavg} , $I_{Lripple}$, I_{Lavg} у наявній вибірці сигналів

Статистика по отриманим значенням вибірок відображена в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

Статистичні дані чотирьох показників

Показник	Міні-мум	Макси-мум	Серед-нє	Меді-ана	Різниця макс.-мін.	Різниця макс.-мін., %
Пульсації напруги $V_{Cripple}$	0.052 В	0.126 В	0.080 В	0.079 В	0.074 В	142.86%
Середня напруга V_{Cavg}	6.016 В	6.083 В	6.040 В	6.040 В	0.067 В	1.11%
Пульсації струму $I_{Lripple}$	1.542 А	3.459 А	2.202 А	2.181 А	1.917 А	124.39%
Середній струм I_{Lavg}	1.355 А	1.584 А	1.500 А	1.501 А	0.229 А	16.93%

Статистичний аналіз наявних сигналів демонструє розподіл, за формою близький до нормального. Графік розподілу, а також коробковий графік зображено на рисунку 3.6. А в таблиці 3.3 зображено дані щодо розподілу у числовому вигляді.

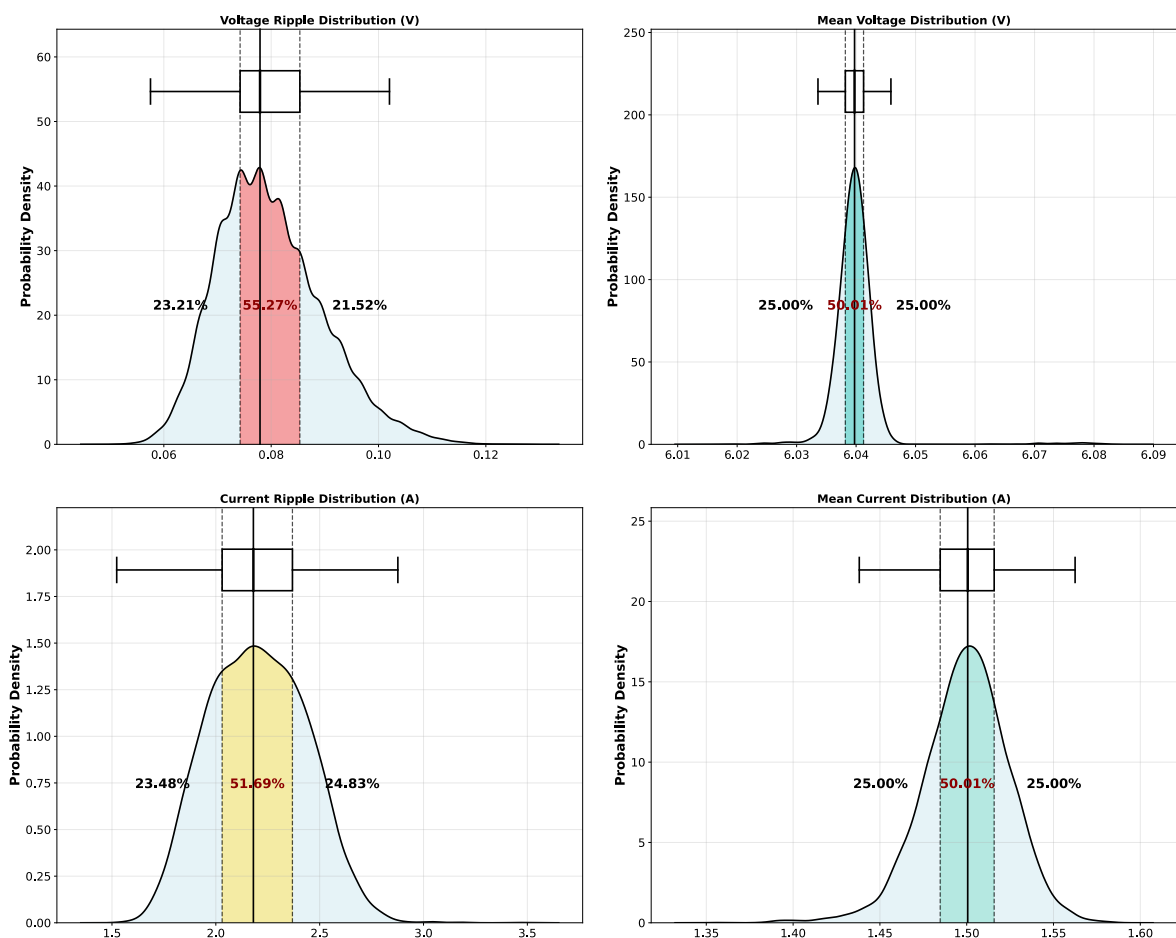


Рисунок 3.6 Графічне зображення розподілу значень чотирьох показників $V_{Cripple}$, V_{Cavg} , $I_{Lripple}$, I_{Lavg} у наявній вибірці сигналів

Дані розподілу чотирьох показників

Показник	Q1	Q3	IQR	Відсоток відліків в межах IQR	Відсоток відліків менших за Q1	Відсоток відліків більших за Q3
Пульсації напруги V_{Cripple}	0.074 В	0.085 В	0.011 В	55.27%	23.21%	21.52%
Середня напруга V_{Cavg}	6.038 В	6.041 В	0.003 В	50.01%	25.00%	25.00%
Пульсації струму I_{Lripple}	2.030 А	2.369 А	0.338 А	51.69%	23.48%	24.83%
Середній струм I_{Lavg}	1.484 А	1.516 А	0.031 А	50.01%	25.00%	25.00%

Як можна бачити з наведеної вище таблиці, співвідношення між мінімальним і максимальним значеннями пульсацій напруги та пульсацій струму є досить високими (вище за 100%), що обумовлено високим рівнем шумів та зазначеними вище проблемами зі схемою вимірювання. Дані умови є чудовими для тестування описаного в даній роботі методу, оскільки дозволяють перевірити коректність її роботи на обладнанні, яке використовується в лабораторних роботах, і є неідеальним. Оскільки метод працює з пороговим значенням θ , яке саме по собі є відносною величиною, то зниження співвідношення розбіжностей мінімального і максимального значення показників є важливим для забезпечення більшої точності і надійності роботи алгоритму.

З таблиці 3.2 також видно, що пульсації струму, при великій відсотковій різниці між максимальним та мінімальним значеннями, мають велике медіанне значення (2.181 А), що призводить до високої абсолютної різниці між максимальним і мінімальним значеннями пульсацій струму: ~ 1.917 А. Оскільки основною з проблем є висока зашумленість сигналів, то доцільним є накладання фільтру, такого як фільтр ковзного середнього. Експериментальним шляхом було визначено ширину вікна

фільтра струму в 17 відліків. З таблиці 3.2 видно, що хоча пульсації напруги і мають велику розбіжність, у порівнянні зі значеннями середньої напруги вони є досить малими, що призвело до рішення фільтрувати тільки сигнали струму I_L , але не напруги V_C .

На рис. 3.7 зображено відсортовані значення чотирьох показників, які були отримані після накладання описаного вище фільтру на всі сигнали з набору даних. Візуально можна бачити, що діапазон значень був змінений. Числові значення наведені у таблиці 3.4. З порівняння таблиць видно, що значення пульсацій напруги та середньої напруги не змінилися, що є очевидним, оскільки фільтрація не була використана до сигналів напруг. Помітно, що відсоткова різниця між максимальним і мінімальним значеннями пульсацій струму виросла з 124.39% до 150%, але водночас абсолютна різниця між максимумом та мінімумом знизилася з 1.918A до 0.677A, що дорівнює зниженню приблизно в 2.83 рази. Таке суттєве зниження розкиду пульсацій свідчить про вдалий результат фільтрації, що матиме позитивний вплив на результати роботи методу.

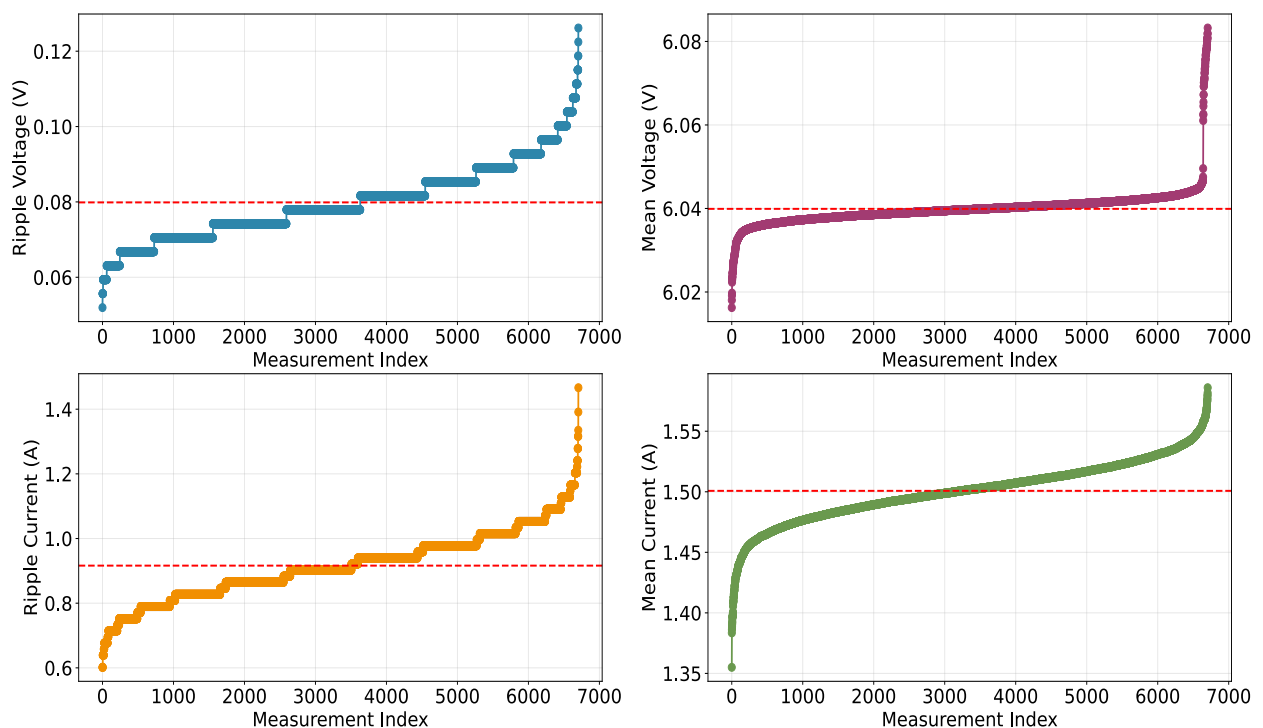


Рисунок 3.7 Графічне зображення діапазонів чотирьох показників $V_{Cripple}$, V_{Cavg} , $I_{Lripple}$, I_{Lavg} у наявній вибірці сигналів після фільтрації струму

Статистичні дані чотирьох показників після фільтрації

Показник	Мінімум	Максимум	Середнє значення	Медіана	Різниця максимум-мінімум	Відсоткова різниця максимум-мінімум
Пульсації напруги V_{Cripple}	0.0519 В	0.126 В	0.080 В	0.078 В	0.074 В	142.86%
Середня напруга V_{Cavg}	6.016 В	6.083 В	6.040 В	6.040 В	0.067 В	1.11%
Пульсації струму I_{Lripple}	0.451 А	1.128 А	0.722 А	0.714 А	0.677 А	150.00%
Середній струм I_{Lavg}	1.350 А	1.585 А	1.500 А	1.501 А	0.235 А	17.43%

Оптимізація моделі. Хоча деякі з параметрів моделі відомі (наприклад, опір навантаження, індуктивність дроселя і так далі), інші залишаються невідомими, бо залежать не від підібраних компонентів, а є паразитними параметрами, що залежать як від монтажу плати, так і від паразитних параметрів самих елементів. Наприклад, одним з таких параметрів є паразитна індуктивність конденсатора.

Постає необхідність дати формальне визначення тому, що є оптимально відкаліброваною моделлю. Класичний критерій мінімізації нев'язки відносно довільно обраного вимірювання є недостатнім: він не гарантує, що відхилення моделі від решти вибірки будуть симетричними, а отже вимагає задання окремих порогів для додатних і від'ємних відхилень кожного показника, що ускладнює як налаштування, так і інтерпретацію діагностичного алгоритму. Тому в роботі критерієм оптимальності калібрування прийнято рівновіддаленість показників моделі від граничних значень експериментальної вибірки. Іншими словами, ідеально оптимізована модель має давати значення, що знаходяться «по середині», тобто потрібно, щоб різниця по кожному з чотирьох показників (середня напруга, пульсація напруги, середній струм, пульсація струму) між максимальним значенням і значенням

моделі приблизно дорівнювала різниці між значенням моделі і мінімальним значенням. Таким чином, модель буде знаходитися «по центру» всього можливого діапазону значень.

З рисунку 3.7 можна бачити, що розподіл значень показників не є рівномірним, тому задля знаходження «центрального» вимірювання, по якому буде оптимізуватися модель, доцільно використати формулу розрахунку «midpoint» (середини відрізка) по відфільтрованих значеннях, а саме:

$$Y_{midpoint} = \frac{y_{min} + y_{max}}{2}, \quad (3.17)$$

де Y – це один з чотирьох показників; y_{min} це мінімальне значення показника; y_{max} – максимальне значення.

Таким чином, якщо припустити, що модель буде ідеально повторювати отриманий через розрахунок «midpoint», тоді її показники будуть рівновіддаленими від крайніх можливих значень кожного з показників, що і є оптимальною поведінкою моделі.

Пошук «midpoint» виконувався лише по показникам з найбільшим розкидом: пульсаціям напруги та пульсаціям струму. Вибір саме цих двох показників пов'язаний з тим, що, як можна бачити з таблиць 3.2, 3.3 та 3.4, ці показники мають набагато більшу дисперсію у порівнянні з середніми значеннями.

Кожному з вимірювань (семплів) рахується відстань від midpoint за формулою:

$$dist(Y) = \left(\frac{Y_i - Y_{midpoint}}{std(Y)} \right)^2, \quad (3.18)$$

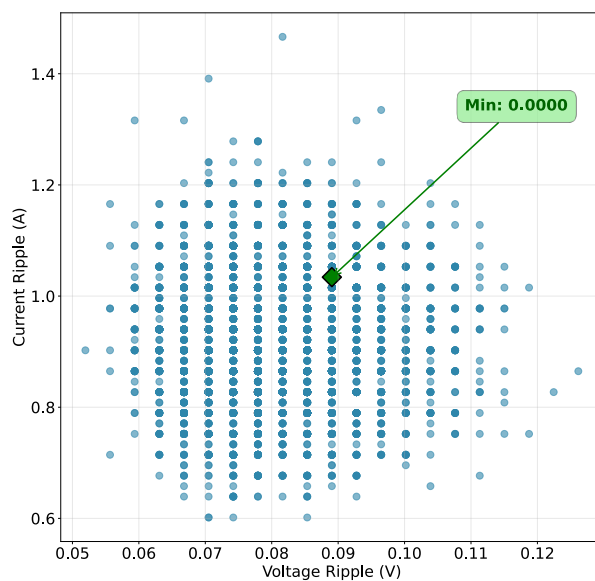
де Y_i - значення i -го сигналу (з набору даних); $std(Y)$ - стандартне відхилення серед усіх сигналів в наборі даних.

Підсумкова відстань вимірювання до «midpoint» визначається як сума відстаней за обома обраними показниками: $d_k = dist(V_{Cripple}) + dist(I_{Lripple})$

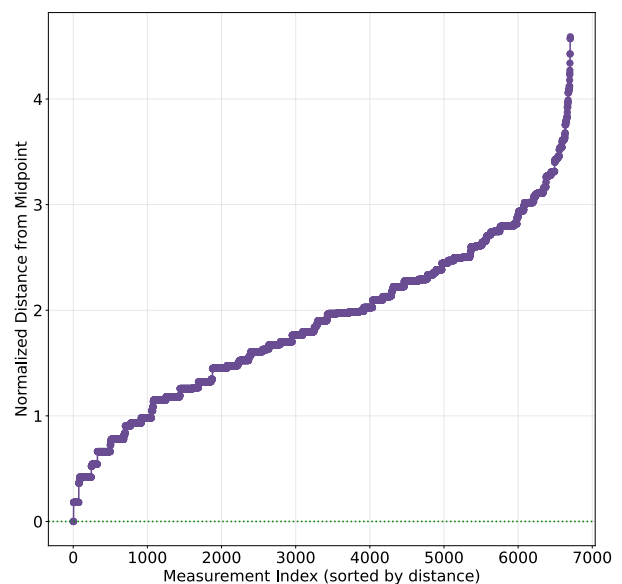
Формула використовує ділення на стандартне відхилення для нормалізації розрахунків, оскільки напруги і струми мають різні одиниці виміру. В результаті буде обрано набір сигналів (сигнал напруги і струму), який має найменшу відстань від «midpoint».

На рисунку 3.8а зображено наявні в наборі даних співвідношення пульсацій струму та напруги, а також виділено відповідне вимірювання, яке має мінімальну «відстань» (в данному випадку 0) до «midpoint», а на рисунку 3.8б – відсортовані значення відстаней.

Отже, отримана пара сигналів (напруги і струму) може бути використана як еталонна для оптимізації моделі. Для оптимізації використовуються різні параметри, як, наприклад, послідовний опір конденсатора, послідовний опір індуктивності, тощо. Повний список буде наведено в таблиці далі. Оскільки перелік параметрів є досить великим, то виконувати оптимізацію шляхом повного перебору не є доцільним через занадто велику тривалість по часу такої оптимізації, саме тому для оптимізації було використано генетичний алгоритм. Даний алгоритм на кожній ітерації намагається наблизити вихідні значення моделі (середні значення та пульсації напруги та струму) до еталонної пари сигналів, що були отримані в попередньому кроці.



а



б

Рисунок 3.8 Співвідношення між пульсаціями напруги і струму – а, нормалізовані відстані до midpoint – б

Таблиця 3.5 містить перелік параметрів, які підбираються генетичним алгоритмом. Шість з семи параметрів кодуються в логарифмічній шкалі через великий діапазон значень (декілька порядків). Це забезпечує рівномірне дослідження

параметрів у всьому діапазоні значень генетичним алгоритмом.

Таблиця 3.5

Використані значення параметрів для оптимізації генетичним алгоритмом

Параметр	Початкове значення	Від	До	Шкала
Час наростання струму затвору транзистора, t_{Gr}	1 нс	0.1 нс	100 нс	Логарифмічна
Час спаду струму затвору транзистора, t_{Gf}	1 нс	0.1 нс	100 нс	Логарифмічна
Опір каналу транзистора, R_{DSon}	1 нОм	1 пОм	1 мОм	Логарифмічна
Опір діода R_D	100 мкОм	1 мкОм	0.1 Ом	Логарифмічна
Струм насичення діода I_S	1 пА	1e-16 А	1e-10 А	Логарифмічна
Опір конденсатора, R_C	0.05 Ом	1 мОм	0.5 Ом	Лінійна
Індуктивність конденсатора, L_C	1 нГн	1 пГн	100 нГн	Логарифмічна

Нормалізовані гени $g \in [0,1]$ декодуються у фактичні значення параметрів за формулами:

Логарифмічна шкала:

$$value = 10^{\log(\min) + g * (\log(\max) - \log(\min))}. \quad (3.19)$$

Лінійна шкала:

$$value = \min + g * (\max - \min), \quad (3.20)$$

де $value$ це кінцеве значення параметра, g – значення гена, $\max$ – значення параметру «до» з таблиці 3.5, $\min$ – значення параметру «від» з таблиці 3.5.

Функція пристосованості (fitness function) має наступний вигляд:

$$fitness = w_{Vrip} * \Delta V_{rip}^2 + w_{Vavg} * \Delta V_{avg}^2 + w_{Irip} * \Delta I_{rip}^2 + w_{Iavg} * \Delta I_{avg}^2, \quad (3.21)$$

де відповідні w є ваговими коефіцієнтами.

Дана функція враховує квадрат різниці кожного показника реального сигналу (з фільтрацією для струму) з модельованим сигналом, помножений на відповідний ваговий коефіцієнт. Наявність квадрату «штрафує» однаковим чином як позитивне, так і негативне відхилення. Наявність ваг дозволяє коректувати алгоритм таким чином, щоб він більше акцентував увагу на конкретному параметрі. Аналогічно до вибору пульсацій як більш важливих значень для розрахунку «midpoint», як було зазначено вище, в даній функції пристосованості також більше приділяється уваги значенням пульсацій. Використані для оптимізації ваги мають наступні значення, сума яких дорівнює 1, як зазначено у таблиці 3.6.

Таблиця 3.6

Вагові коефіцієнти

Параметр	Вага
Середня напруга V_{Cavg}	0.35
Пульсації напруги $V_{Cripple}$	0.3
Середній струм I_{Lavg}	0.2
Пульсації струму $I_{Lripple}$	0.15

Даний генетичний алгоритм був запущений для 100 поколінь з розміром покоління в 50 одиниць. В початкову популяцію було додано один початковий варіант і його 4 варіації з відхиленнями в $\pm 50\%$, що визначає відправну точку алгоритму. Інших 45 індивідів було створено випадковим чином. В якості механізму селекції було використано турнір, для кросоверу – імітований бінарний кросовер (Simulated Binary Crossover). Мутація відбувалася адаптивно: в алгоритмі реалізовано зниження шансу мутації з плином часу, що допускає наявність великої кількості хаотичних змін на початку пошуку, але з часом мутації стають більш стабільними:

$$rate = \frac{1}{n} \cdot \left(1 - \frac{gen_i}{gen_{max}}\right), \quad (3.22)$$

де n – кількість генів, gen_i – номер поточного покоління, gen_{max} – загальна кількість поколінь, яка використовується в алгоритмі.

Крім того, в алгоритмі використано стратегію елітизму. П'ять кращих

хромосом гарантовано переходять в наступне покоління без змін, що захищає алгоритм від випадкової втрати кращого знайденого рішення через невдале схрещення чи мутацію. Допуск симетрії відхилень, який використовується на етапі 4 методу для перевірки придатності результату калібрування, прийнято $\varepsilon = 1$ в.п., виходячи з точності оцінювання пульсацій за наявного рівня шуму вимірювань.

Результати виконання алгоритму наведено у таблиці 3.7, і є близькими до оптимальних значення невідомих параметрів моделі.

Таблиця 3.7

Результати ідентифікації паразитних параметрів модельованого перетворювача

Параметр	Початкове значення	Оптимізоване значення
Час наростання струму затвору транзистора, t_{Gr}	1 нс	0.1007 нс
Час спаду струму затвору транзистора, t_{Gf}	1 нс	82.65 нс
Опір каналу транзистора, R_{DSon}	1 нОм	3.316 пОм
Опір діода R_D	100 мкОм	1 мкОм
Струм насичення діода I_S	1 пА	2.423e-15 А
Опір конденсатора, R_C	0.05 Ом	0.0878 Ом
Індуктивність конденсатора, L_C	1 нГн	0.322 нГн

Для перевірки того, наскільки отримані генетичним алгоритмом значення насправді є оптимальними, треба визначити статистику щодо співвідношення значень сигналів програмної моделі (з встановленими оптимізованими значеннями) з реальними сигналами. Це доцільно зробити на вже існуючих, зібраних на проміжку часу приблизно в 4 години, даних. На рисунку 3.9 зображено графіки відхилень.

Статистичні дані щодо відхилень різних реальних сигналів від модельованого сигналу з використанням оптимізованих значень моделі наведено в таблиці 3.8.

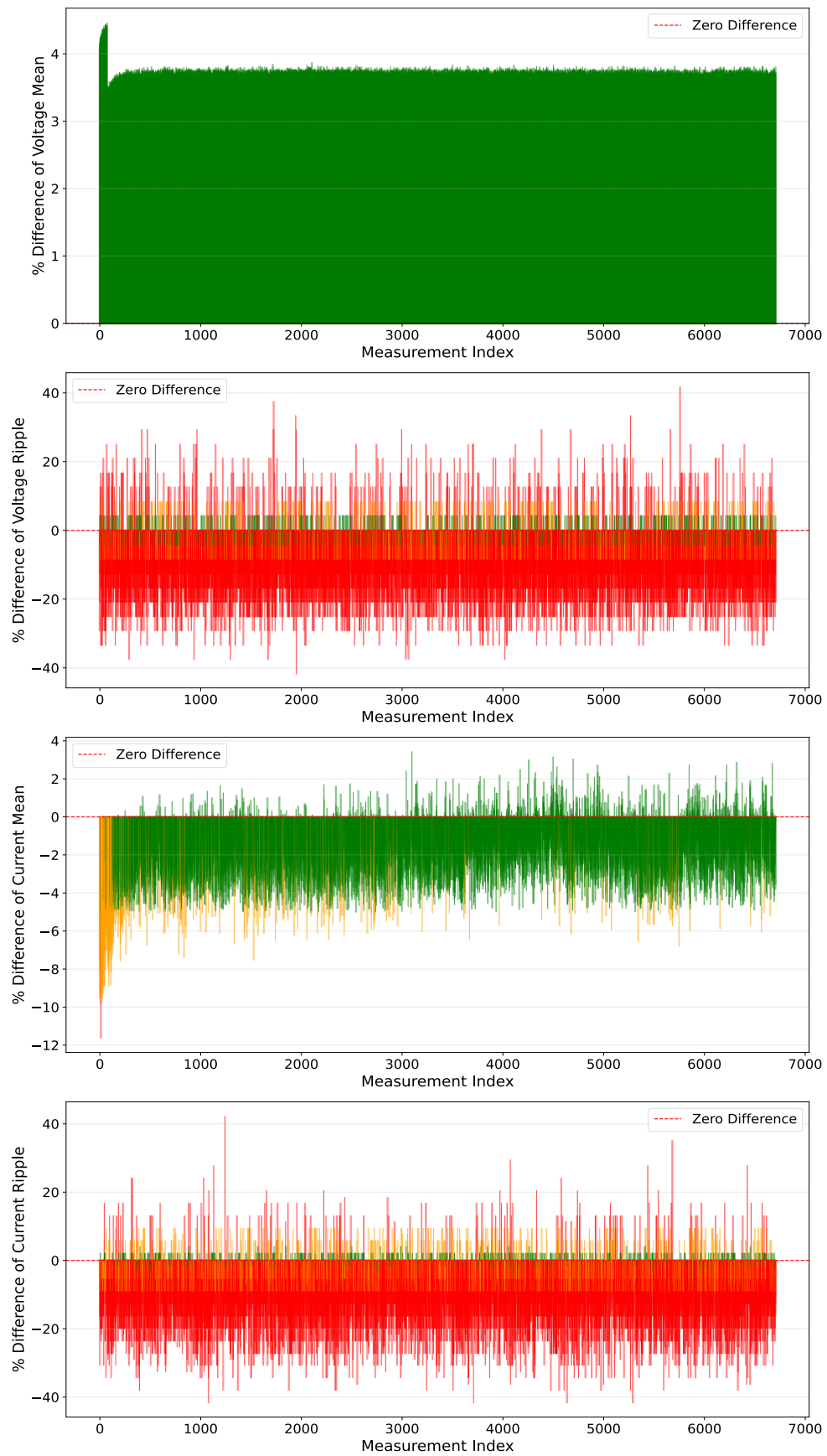


Рисунок 3.9 Графіки відхилень поведінки оптимізованої моделі перетворювача від кожного з наявних у вибірці сигналів у відсотковому співвідношенні

Статистика відхилень показників

Показник	Середнє відх., %	Медіана відх., %	Мінімальне відх., %	Максимальне відх., %
Середня напруга V_{Cavg}	3.71	3.71	3.3	4.45
Пульсації напруги $V_{Cripple}$	-10.3	-12.48	-41.66	41.69
Середній струм I_{Lavg}	-2.12	-2.06	-11.63	3.43
Пульсації струму $I_{Lripple}$	-11.13	-12.46	-41.64	42.25

З таблиці 3.8 та рисунку 3.9 видно, що оптимізація моделі для отримання «midpoint» по пульсаціям напруги та струму була виконана цілком успішно, оскільки мінімальні та максимальні відхилення цих показників є приблизно рівними: -41.66% та 41.69% для пульсацій напруги, а також -41.64% та 42.25% для пульсацій струму відповідно. Різниця між модулями мінімального та максимального відхилень становить 0.03 в.п. для пульсацій напруги та 0.61 в.п. для пульсацій струму, тобто умову симетрії $||\min \delta| - |\max \delta|| \leq \varepsilon$ виконано для обох показників, за якими визначався еталонний сигнал. Максимальні по модулю відхилення були використані як початкові значення θ для подальшого калібрування цифрового двійника в розділі 2.4.

3.3 Структура інформаційної технології діагностування відмов

Розроблені в розділах 2 і 3 методи утворюють єдину інформаційну технологію діагностування відмов напівпровідникових перетворювачів електроенергії на основі цифрових двійників. Її структуру у вигляді діаграми потоків даних зображено на рисунку 3.10. Зовнішніми сутностями є об'єкт діагностування (перетворювач постійного струму) та оператор; сховищами даних є відкалібрована модель цифрового двійника $M(X^*)$ (D1), порогові значення Θ (D2) і таблиця відповідності (D3). Процеси згруповано у дві фази.

Офлайн-фаза (процеси 1.1-1.4) виконується одноразово для конкретного екземпляра пристрою. Процес 1.1 відповідає етапам 1-2 методу калібрування (підрозділ 3.2), на якому фільтрується калібрувальна вибірка сигналів справного

пристрою, для кожного вимірювання обчислюється вектор показників Y_k , і за критерієм рівновіддаленості обирається цільовий вектор Y_{k*} . Процес 1.2 (етап 3) ідентифікує генетичним алгоритмом вектор паразитних параметрів X^* у заданих оператором межах пошуку, а результат зберігається у D1. Процес 1.3 (етап 4) верифікує модель $M(X^*)$ на всій вибірці Y_k та формує початкові пороги сірої зони Θ , які, після експериментального уточнення (підрозділ 2.4), зберігаються у D2. Процес 1.4 на основі моделі з D1 і порогів з D2 синтезує таблицю відповідності методом систематичного моделювання (підрозділ 2.5, додаток Б) і записує її у D3.

Онлайн-фаза (процеси 2.1-2.5) виконується циклічно під час експлуатації. Поточні осцилограми $V_C(t)$, $I_L(t)$ фільтруються та перетворюються на вектор Y_{meas} (2.1). Для поточних режимних параметрів (V_{in} , D , C , R_{load}) модель із D1 розраховує еталонний вектор Y_{DT} (2.2). Обчислюється нормалізоване відхилення ΔY за формулою (2.2) (процес 2.3), дискретизується у вектор напрямків $R \in \{+, -, 0\}^m$ (2.4) з використанням порогів Θ із D2. Якщо всі компоненти R дорівнюють «0», оператору передається статус «Норма», в іншому випадку – статус «Відмова», а за таблицею відповідності з D3 визначається вектор причин E , тобто деградований елемент і ступінь зміни його параметра (2.5).

З діаграми видно, що фази пов'язані між собою виключно через три сховища даних. Усі обчислювально витратні операції ($N \cdot T$ запусків симуляції під час ідентифікації, багатократне моделювання під час синтезу таблиці) зосереджені в офлайн-фазі, тоді як онлайн-фаза зводиться до одного розрахунку еталонного вектора, поелементних арифметичних операцій і пошуку в таблиці з 19 рядків, що й забезпечує придатність технології для обладнання з обмеженими ресурсами. Зворотний зв'язок із фізичним об'єктом реалізується через оператора (людина в контурі), що узгоджується з прийнятим у підрозділі 1.2.1 визначенням цифрового двійника. А також потенційно може бути допрацьовано до автоматичного зв'язку.

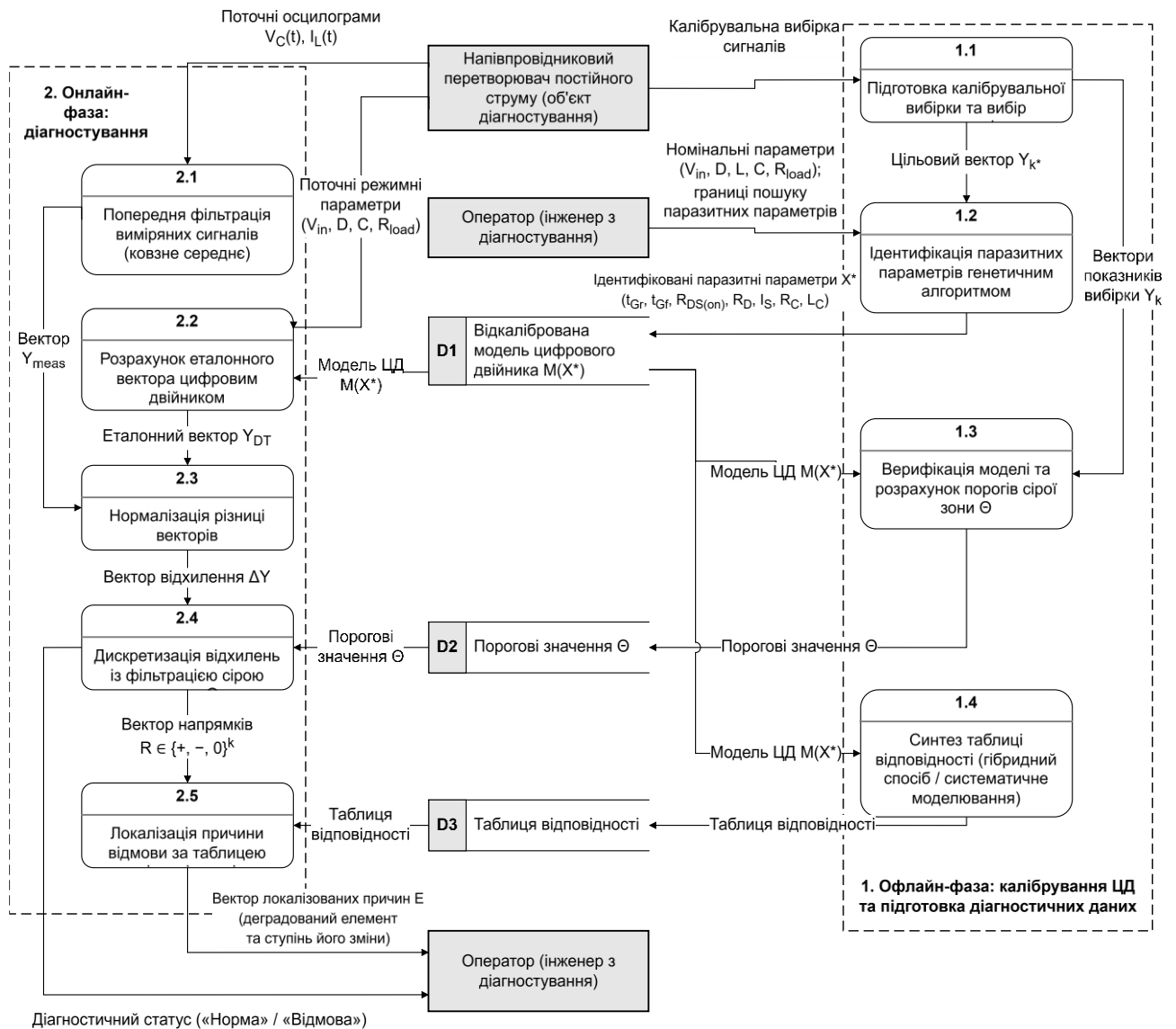


Рис. 3.10. Діаграма потоків даних інформаційної технології діагностування відмов перетворювача постійного струму на основі цифрового двійника

3.4 Висновки до розділу 3

У даному розділі отримали подальший розвиток методи калібрування цифрових двійників перетворювачів постійного струму на основі генетичних алгоритмів: запропоновано критерій вибору еталонного сигналу за рівновіддаленістю його показників від граничних значень експериментальної вибірки, обґрунтовано вибір генетичного алгоритму як засобу розв’язання відповідної задачі оптимізації та показано, що симетричні відхилення відкаліброваної моделі безпосередньо придатні для використання як початкові пороги діагностування.

Основні результати розділу:

1. Проведено порівняльний аналіз чотирьох класів методів оптимізації (градієнтні методи, метод оптимізації рою частинок, алгоритм сірого вовка та генетичний алгоритм) стосовно задачі ідентифікації паразитних параметрів перетворювача постійного струму. Встановлено, що градієнтні методи є непридатними через схильність до збіжності в локальних мінімумах, а ройові алгоритми (PSO, GWO) мають ризик передчасної збіжності через відсутність явного механізму рекомбінації між перспективними регіонами простору пошуку.
2. Сформульовано математичну модель задачі ідентифікації як задачу глобальної мінімізації зваженої суми квадратів відхилень між виходами моделі та реального пристрою за чотирма показниками: середньою напругою, пульсаціями напруги, середнім струмом та пульсаціями струму. Розроблено функцію пристосованості з ваговими коефіцієнтами, що враховують різну чутливість показників до зміни паразитних параметрів.
3. Виявлено, що застосування генетичних алгоритмів для ідентифікації паразитних параметрів перетворювачів постійного струму з метою калібрування діагностичних цифрових двійників є малодослідженою областю: переважна більшість робіт або застосовує інші метаевристичні алгоритми для тієї ж задачі, або використовує генетичні алгоритми для принципово інших задач оптимізації в силовій електроніці.
4. Впроваджено підхід із логарифмічним кодуванням генів, що забезпечує рівномірне дослідження параметричного простору незалежно від масштабу конкретного параметра. Підхід дозволяє ефективно обробляти параметри, діапазони яких охоплюють до 9 порядків величини (від 1 пОм до 1 мОм для опору каналу транзистора), шляхом нормалізації генів до інтервалу $[0, 1]$ із подальшим декодуванням у логарифмічній або лінійній шкалі.
5. Запропоновано критерій вибору еталонного сигналу для калібрування, за яким цільовим є вимірювання, показники якого є максимально рівновіддаленими від граничних значень експериментальної вибірки (концепція «midpoint»). На відміну від калібрування за довільним або

усередненим вимірюванням, такий критерій забезпечує симетричність відхилень відкаліброваної моделі відносно всього діапазону спостережуваних значень і дозволяє задавати єдине порогове значення θ для додатних і від'ємних відхилень кожного показника.

6. Реалізовано та апробовано генетичний алгоритм із турнірною селекцією, імітованим бінарним кросовером, адаптивною мутацією та елітизмом для ідентифікації семи паразитних параметрів понижуючого імпульсного перетворювача напруги на основі 6705 експериментальних вимірювань. Отримано практично симетричні відхилення оптимізованої моделі від реальних сигналів: від -41,66% до +41,69% для пульсацій напруги та від -41,64% до +42,25% для пульсацій струму, що підтверджує коректність методу визначення еталонного сигналу та успішність оптимізації.
7. Ідентифіковані паразитні параметри використано для калібрування цифрового двійника, який у розділі 2 виступає джерелом еталонних значень та основою для побудови таблиці відповідності. Таким чином, результати цього розділу є не просто окремою незалежною задачею оптимізації, а складовим етапом єдиної інформаційної технології діагностики, експериментально верифікованою у розділі 5. Крім того, отримані максимальні по модулю відхилення ($\pm 41.7\%$ для пульсацій напруги та $\pm 42.3\%$ для пульсацій струму) безпосередньо використано як початкові значення порогів θ у підрозділі 2.4, що робить калібрування не лише етапом підвищення точності моделі, а й джерелом діагностичних параметрів методу.

Основні результати розділу опубліковано в працях [150, 151]

РОЗДІЛ 4. Вибір технології віддалених лабораторій для імплементації інформаційної технології діагностування відмов

Як було встановлено в підрозділі 1.3, дистанційні лабораторії відіграють подвійну роль у контексті даного дисертаційного дослідження: з одного боку, вони є інструментом забезпечення віддаленого доступу до реального електронного обладнання, а з іншого – технологічною основою для верифікації цифрових двійників перетворювачів постійного струму в умовах, наближених до реальної експлуатації. Аналіз літератури (підрозділ 1.3.4) виявив прогалину в сучасному стані наукових досліджень на тематику дистанційних лабораторій: незважаючи на існування численних платформ та архітектурних підходів до побудови дистанційних лабораторій, у науковій літературі відсутній уніфікований метод їх порівняння, який б дозволяв обґрунтовано обирати технологічне рішення для конкретних потреб.

Екосистема дистанційних лабораторій характеризується значною фрагментованістю: кожна установа, як правило, розробляє власну систему, застосовуючи різноманітне електронне обладнання, програмні стеки, комунікаційні протоколи та архітектурні підходи. Ця різноманітність, зумовлена як специфікою предметних галузей, так і історичними обставинами розвитку окремих проєктів, суттєво ускладнює прийняття обґрунтованого рішення при проєктуванні нової дистанційної лабораторії. Проблема загострюється тим, що для дистанційних лабораторій силової електроніки з інтегрованою діагностичною функціональністю на базі цифрових двійників висувуються специфічні вимоги, зокрема щодо швидкодії в режимі реального часу, можливості збору та передачі аналогових сигналів з високою точністю, а також інтеграції з програмним забезпеченням моделювання та ідентифікації параметрів.

Метою даного розділу є розробка методу порівняння інформаційних технологій побудови дистанційних лабораторій електронного обладнання та її застосування для визначення найбільш придатної технології в контексті задач дисертаційного дослідження. Метод базується на системі зважених критеріїв, що враховують як загальні характеристики технологій (актуальність програмного стеку, рівень

підтримки, можливість інтеграції з системами керування навчанням), так і специфічні вимоги, критичні для лабораторій, що стосуються роботи з електронікою (швидкодія в режимі реального часу, простота розгортання та конфігурації). Інтегральний показник, що обчислюється за запропонованою формулою, дозволяє кількісно зіставити різні технології та обґрунтувати вибір оптимального рішення.

Для проведення порівняльного аналізу було відібрано шість найбільш відомих та задокументованих систем: WebLabDeusto, LabDiscoveryEngine, VISIR Open Lab Platform 5.0, iLab Shared Architecture, FREE та edrys-Lite. Кожна з цих систем представляє окремий архітектурний підхід та має власну історію розвитку, що робить їх репрезентативною вибіркою для апробації запропонованого методу.

4.1 Аналіз і порівняння найбільш поширених систем дистанційних лабораторій

Віддалені лабораторії з реальним обладнанням представляють собою системи, які дозволяють студентам керувати фізичними приладами та проводити експерименти через інтернет. На рисунку 4.1 зображено структурну схему типової віддаленої лабораторії, яка складається з:

1. Користувача.
2. Лабораторного сервера (Laboratory Server): елемент, який потрібний для цілей реалізації черги доступів до обладнання, збереження інформації про сесії, інтеграції з системами керування навчанням тощо.
3. Блоку контролю (Controlling block): елемент, що слугує для керування електронним обладнанням, а саме: встановлення сигналів, завантаження вбудованого програмного забезпечення, вимірювання сигналів на виході тощо.
4. Електронного обладнання (Hardware): власне саме електронне обладнання, що вивчається користувачем.
5. Опціонально в лабораторії може бути використана відеокамера, яка забезпечуватиме трансляцію обладнання, якщо це важливо для виконання лабораторної роботи (наприклад, шляхом візуального контролю за

переміщенням рухомих частин, індикації на обладнанні тощо).

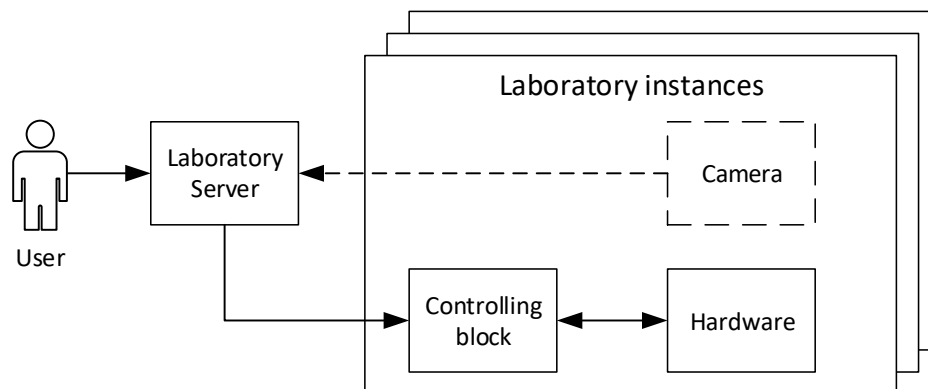


Рис. 4.1. структурна схема типової віддаленої лабораторії

Блок «Лабораторний сервер» здебільшого не є унікальним для кожної конкретної лабораторії, а має виконувати одні й ті самі допоміжні задачі, такі як аутентифікація, авторизація, створення черги користувачів, бронювання лабораторії тощо [123, 124]. Тому постає необхідність у створенні додаткових програмних компонентів системи віддалених лабораторій, які можуть спростити створення дистанційних лабораторій шляхом реалізації однієї або багатьох наступних функцій:

1. Надання доступу до безпосередньо інтерфейсу віддаленої лабораторії.
2. Автентифікації та авторизації користувачів.
3. Створення черги для користувачів у разі перевищення кількості лабораторій кількістю користувачів.
4. Інтеграція з LMS, за допомогою якої викладачі можуть відслідковувати прогрес кожного окремого студента.

Такі програмні компоненти часто називають Remote Laboratory Management System (RLMS), оскільки вони виконують загальні задачі керування лабораторією.

WebLabDeusto та LabDiscoveryEngine. Станом на сьогодні відомі декілька таких систем, однією з таких систем є *LabDiscoveryEngine*, яка являє собою платформу з відкритим вихідним кодом, що створена з використанням мови програмування Python [125]. Вона є логічним продовженням системи *WebLabDeusto* [126], що була розроблена в університеті Деусто в Іспанії. Варто зазначити, що *WebLabDeusto* є застарілою з технічної точки зору у порівнянні з *LabDiscoveryEngine*, оскільки перша використовує Python версії 2 в той час, коли актуальною є версія 3.

Помітно, що розвиток *WebLabDeusto* був зупинений у зв'язку з початком роботи над *LabDiscoveryEngine*, про що свідчить історія змін на github сторінці даної системи, остання зміна в якій (на момент написання роботи) була зроблена 31 серпня 2022 року [127].

WebLabDeusto за замовчуванням виконує наступні функції як складова дистанційної лабораторії:

1. Резервація певної лабораторії для використання користувачем.
2. Аутентифікація користувача.
3. Авторизація користувача.
4. Планування (черга користувачів).
5. Відстежування активності користувачів (вхід в систему, вихід з системи тощо).
6. Комунікація користувача з «блоком контролю» з рисунку 4.1 [126].

Дана система може працювати в двох режимах:

1. Керована лабораторія (Managed laboratory).
2. Некерована лабораторія (Unmanaged laboratory).

У режимі керованої лабораторії *WebLabDeusto* повністю контролює комунікацію між клієнтом і сервером експерименту. Розробникам надано API та бібліотеку *WebLabDeusto* для створення клієнтської (переважно з використанням мови JavaScript) та серверної (з мовами програмування та технологіями Python, Java, .NET, C, C++, Node.js, LabVIEW тощо) частин лабораторії. Цей підхід добре підходить для команд, які менш досвідчені у web-розробці, оскільки *WebLabDeusto* бере на себе більшість складних аспектів.

У режимі некерованої лабораторії розробники мають більше свободи у виборі технологій та фреймворків для створення web-додатка лабораторії, оскільки *WebLabDeusto* в цьому випадку відповідає лише за базові функції, такі як планування, аутентифікація та авторизація. Комунікація відбувається безпосередньо між клієнтом і сервером лабораторії. Цей підхід підходить для досвідчених web-розробників та складніших лабораторій.

WebLabDeusto підтримує різні типи некерованих лабораторій, включаючи

використання бібліотеки *weblablib* для Python, HTTP-інтерфейс для будь-яких веб-технологій, експериментальну підтримку *LabVIEW Remote Panels* та обмежену підтримку віртуальних машин.

Під HTTP-інтерфейсом мається на увазі те, що *WebLabDeusto* не вимагає від розробників, які хочуть використати систему задля отримання переваг, що описані вище, використання конкретних мов програмування і технологій, а дозволяє створювати на основі будь-яких технологій застосунки, що лише мають реалізувати певний набір операцій за допомогою протоколу HTTP та API, який описаний в документації.

Система забезпечує гнучкість у розгортанні, підтримує інтеграцію з системами управління навчанням (LMS) та федерацію лабораторій [123, 124] між різними установами, забезпечуючи доступ до ресурсів закладу-партнера з аналогічною дистанційною лабораторією, якщо всі екземпляри в першому закладі вже зайняті, в той час як в черзі все ще є бажаючі отримати доступ. *WebLabDeusto* також надає інструменти для аналітики навчання та моніторингу використання лабораторій.

Вибір між керованим та некерованим підходом залежить від досвіду розробників, складності лабораторії та конкретних вимог проєкту. *WebLabDeusto* прагне забезпечити гнучкість, щоб задовольнити різноманітні потреби в галузі віддалених лабораторій для освіти та досліджень [126].

На основі системи *WebLabDeusto* побудовано систему *LabsLand*, яка являє собою набір дистанційних лабораторій, що фізично розташовані в різних частинах світу. За допомогою даної системи, користувачі можуть отримати доступ до реального обладнання в будь-якій підключеній до системи лабораторії [128].

З точки зору організації архітектури, дистанційні лабораторії, що побудовані з використанням *WebLabDeusto*, остання виступає лабораторним сервером з рис. 4.1. Вона перенаправляє клієнтський застосунок до блоку контролю, що дозволяє самій *WebLabDeusto* бути лише прошарком і не залежати від конкретних лабораторій та експериментів.

Розробники системи *LabDiscoveryEngine*, яка, як було зазначено вище, є логічним продовженням системи *WebLabDeusto*, надають для використання

інструмент *LabDiscoveryLib* з відкритим вихідним кодом [125]. Це бібліотека використовує мікрофреймворк *Flask*, що базується на мові програмування *Python*. Вона спрощує створення дистанційних лабораторій, оскільки реалізує в собі той HTTP-інтерфейс, про який йшла мова вище, надаючи розробнику можливість використати його за допомогою декораторів в мові програмування *Python*.

Окрім того, дана бібліотека, виходячи з документації [129], надає наступні елементи функціональності:

1. Фонові задачі (Tasks), що виконуються в окремих потоках.
2. Підтримка протоколу *WebSockets*.
3. Підтримка багатьох лабораторій на одному сервері.
4. Використання користувачів з бази даних.
5. Сторінка для користувачів, що не мають доступу до системи.
6. Керування обмеженнями по часу.
7. Підтримка протоколу *http*.
8. Керування потоками та процесами.
9. Інтернаціоналізація (i18n).
10. Базова URL, що надає змогу реалізовувати більш, ніж одну лабораторію на одному сервері.

Для конфігурації лабораторій використовується файл у форматі *YAML*, де вказуються IP адреси конкретних блоків контролю (наприклад, застосунків з використанням бібліотеки *LabDiscoveryLib*) і певні теги, що слугують для кастомізації лабораторій.

На рисунку 4.2 зображено структурну схему *LabDisocoverityEngine*, яка спільна так само і для *WebLabDeusto* з єдиною відмінністю в тому, що використовуються нові технології (*LabDiscoveryEngine* та *LabDiscoveryLib* замість *WebLabDeusto* та *WebLabLib*). Під «Custom Backend» мається на увазі те, що *LabDiscoveryLib* є лише опцією, якою можна знехтувати й написати власну реалізацію блоку контролю.

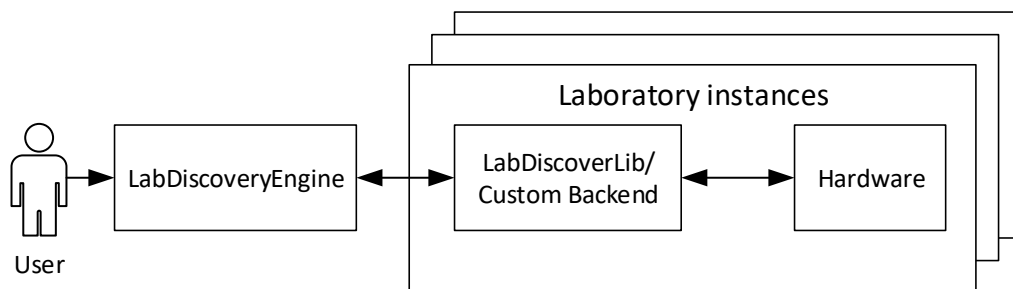


Рис. 4.2. Структурна схема системи LabDiscoveryEngine

Дистанційні лабораторії в системі iLab. Іншою системою дистанційної лабораторії є *iLab*, проєкт якої було розпочато в 1998 році в Массачусетському технологічному університеті в США. Основною причиною для створення системи, як зазначено в [130], була відсутність лабораторної складової курсу по напівпровідниковим пристроям в університеті, й було вирішено зробити лабораторні роботи з можливістю дистанційного доступу. Проєкт розвивався з часом і в 2003 році з'явився курс, що є предметом бакалаврату в Університеті Чалмерса в Швеції, на якому навчалися 350 студентів [130, 131].

На початку, кожна лабораторія *iLab* розроблялася окремо, без використання спеціальних фреймворків. Згодом, розробники *iLab* усвідомили, що розробляти кожен лабораторію і кожен експеримент з нуля є витратною по часу задачею, крім того, в таких лабораторіях була помічена проблема підвищеного навантаження на менеджера лабораторій [130]. Таким чином почалася робота над *iLab Shared Architecture*, ціллю якої було підвищити масштабованість як процесу розробки дистанційних лабораторій, так і їх менеджменту.

Ця система реалізує ідею розподілення лабораторних експериментів на 3 категорії:

1. Серійні експерименти (batched experiments): експерименти, в яких весь хід роботи може бути описано та визначено заздалегідь. Наприклад, експерименти з FPGA, де чітко наперед прописані сигнали, що подаються на цифрову схему.
2. Інтерактивні експерименти (interactive experiments): експерименти, в яких студенту необхідним є доступ до лабораторії в режимі реального часу з можливістю впливати на систему, що досліджується.

3. Сенсорні експерименти (sensor experiments): в таких експериментах користувачі аналізують потоки даних в режимі реального часу, але не впливають на дані, що вимірюються. [130]

Ідея полягає у тому, що інфраструктура під різні типи може бути різною. Так, наприклад, для експериментів другого типу зручно використати або чергу користувачів на експеримент, або бронювання певних часових інтервалів. В той самий час, задля збільшення ефективності системи дистанційних лабораторій, експерименти першого типу можна проводити в режимі офлайн: користувач завантажує певний файл, що несе в собі інструкції з виконання лабораторної роботи, далі він може від'єднуватися від RLMS і чекати, поки не з'являться результати виконаної ним роботи. Архітектура *iLab Shared Architecture* для серійних експериментів (batched experiments) зображена на рисунку 4.3, яка досить схожа на зображену на рис. 4.1, та складається з:

1. Клієнтського застосунку User, який є унікальним для конкретного експерименту.

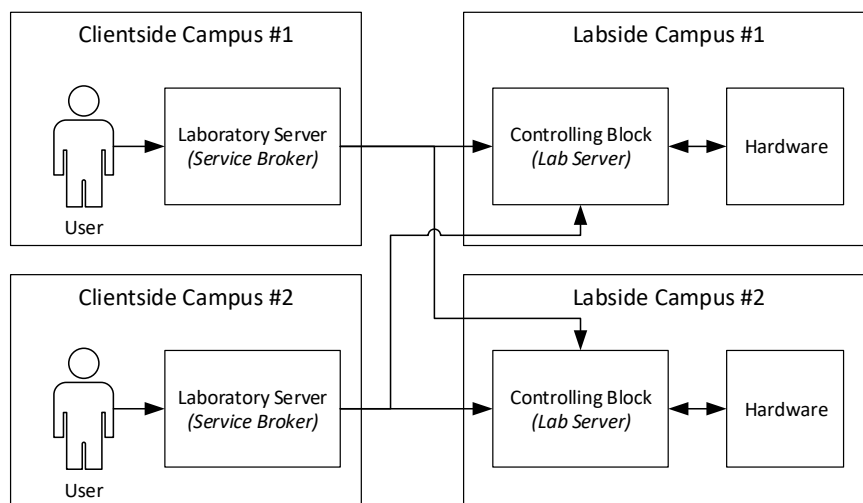


Рис. 4.3. Топологія архітектури iLab для серійних експериментів на основі [132]

2. Лабораторного сервера, Service Broker в термінології iLab.
3. Блоку контролю, Lab Server в термінології iLab, який також є унікальним для конкретного експерименту.

Задля комунікації в системі використовується кодування XML, який в наш час

поступається популярністю та розповсюдженістю формату JSON.

Для проведення дистанційного експерименту за допомогою *iLab*, користувач спочатку авторизується на лабораторному сервері, обирає експеримент, після чого у нього відкривається відповідний клієнтський застосунок, в який він, в свою чергу, вводить необхідні для проведення експерименту дані. Лабораторний сервер отримує ці дані і згодом відправляє блоку керування на обробку (власне виконання експерименту).

Іншими словами, принцип дії помітно відрізняється від *WebLabDeusto* та *LabDiscoveryEngine*, де лабораторний сервер лише перенаправляє користувацький застосунок до блоку контролю. Вся інформація про виконання експерименту зберігається на лабораторному сервері, і весь хід виконання роботи керується лабораторним сервером.

На рисунку 4.4 зображено топологію архітектури для інтерактивних експериментів, яка помітно відрізняється від зображеної на рисунку 4.2.

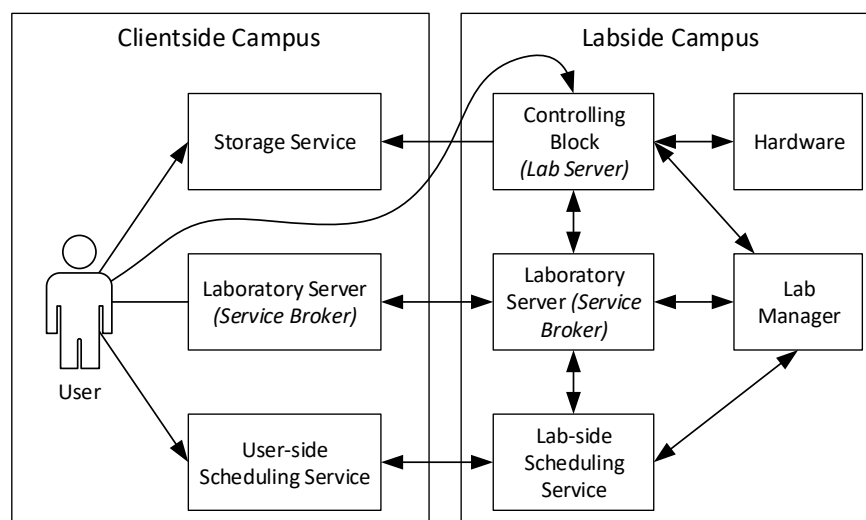


Рис. 4.4. Топологія архітектури *iLab* для інтерактивних експериментів (за [130])

У випадку з архітектурою *iLab* для інтерактивних експериментів, лабораторний сервер не використовується як єдиний вузол системи, через який відбувається комунікація між клієнтським застосунком та блоком контролю. Він же слугує для авторизації користувачів шляхом створення ключів доступу. В даній конфігурації підхід більш схожий на той, що використовується в *WebLabDeusto* та *LabDiscoveryEngine*, бо після початкового етапу користувацький застосунок та блок

контролю починають взаємодіяти напряду, без використання зайвої ланки у вигляді лабораторного сервера.

Також, в даній архітектурі вводяться сервіс зберігання (Storage Service), необхідний для збереження даних щодо виконання експериментів та сервіси планування (Scheduling Services) задачі яких описані в [130] і [131]. Недоліком цього є складність системи, причому система починає мати набагато більше складових, аніж у попередньо розглянутих архітектурах. Наприклад, в *iLab* використовуються сервіси планування (до того ж їх існує два типи [130]) для задач скидання стану лабораторії для початкового перед тим, як надати користувачу, який забронював певний час, доступ до лабораторії. І хоча ця функціональність справді є необхідною в деяких випадках, вона може бути реалізована простіше, без залучення додаткового сервісу, як це зроблено в *LabDiscoveryEngine*: в останньому блок керування має змогу самостійно сповістити лабораторний сервіс про готовність до завершення поточної сесії, або ж зробити необхідні речі перед початком нової сесії. Крім цього, недоліком також є відсутність підтримки інтеграції з LMS [132, 133], а також те, що з 2019 року проект є закритим.

Дистанційні лабораторії VISIR.

Іншою системою дистанційних лабораторій є *VISIR*, що була розроблена в Технологічному інституті Блекінге, Швеція. Дана система близько 10 років використовувалася в університеті Деусто в Іспанії розробниками *WebLabDeusto* та *LabDiscoveryEngine*. За результатами експлуатації було опубліковано дослідження [135], в якому наводяться переваги використання даної системи в університеті. Аналогічно, про позитивний вплив даної системи на навчання вказує дослідження [136].

Технологія *VISIR*, як зазначено у [137], складається з наступних програмних компонентів (рис. 4.5): web-інтерфейс користувача, клієнт експерименту, сервер вимірювань та сервер експерименту. Web-інтерфейс користувача базується на мові PHP, в той час, як клієнт експерименту – на Adobe Flash, він реалізує віртуальний інтерфейс для обладнання (осцилограф, мультиметр, генератор, макетна плата тощо). Сервер вимірювань реалізовано на мові Microsoft Visual C++, він здійснює

авторизацію, автентифікацію, контроль часу експерименту та взаємодію користувача (клієнт експерименту) з обладнанням (сервер експерименту). Особливістю серверу експерименту є те, що він реалізований на LabView, що суттєво ускладнює розробку власних дистанційних лабораторій у випадку, якщо заклад не має відповідної ліцензії на програмне забезпечення. Крім цього, для роботи дистанційної лабораторії необхідне спеціалізоване електронне обладнання, яке складається з друкованих плат, розроблених винахідниками даної технології, а також спеціалізованої комп'ютерної платформи PXI (PCI eXtensions for Instrumentation) або LXI (LAN eXtensions for Instrumentation) виробництва компанії National Instruments.

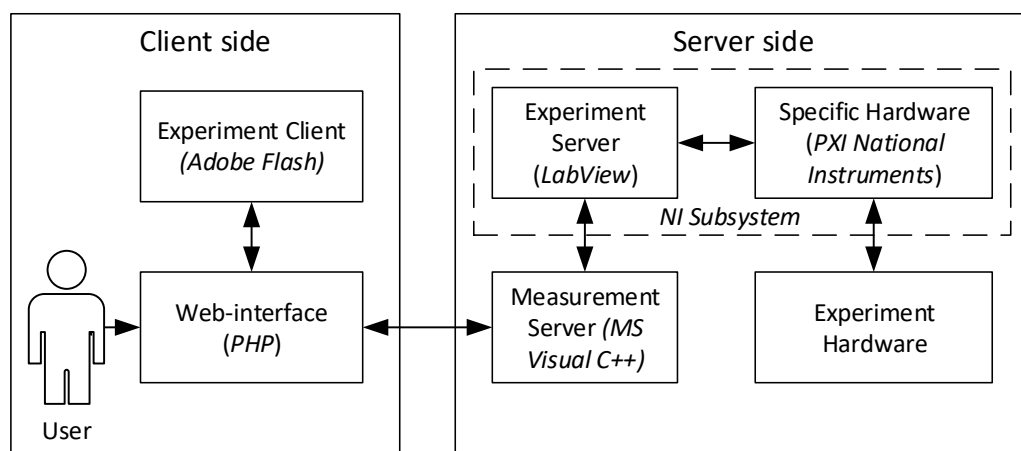


Рисунок 4.5. Топологія архітектури VISIR

На рисунку 4.6 зображено зовнішній вигляд електронного обладнання системи *VISIR*, знизу – обладнання PXI від National Instruments, зверху – стек друкованих плат, на яких реалізовано комутацію електричних компонентів у відповідності до схеми, яку користувач синтезує в клієнті експерименту. Дана система використовує реле для перемикавання компонентів електричної схеми, які спрацьовують досить швидко, після чого вона робить виміри. Оскільки час переключення реле і вимірювання напруги досить невеликий для людини, то ця система має змогу обробляти багатьох користувачів псевдопаралельно, реалізуючи таким чином роботу майже в режимі реального часу [138].

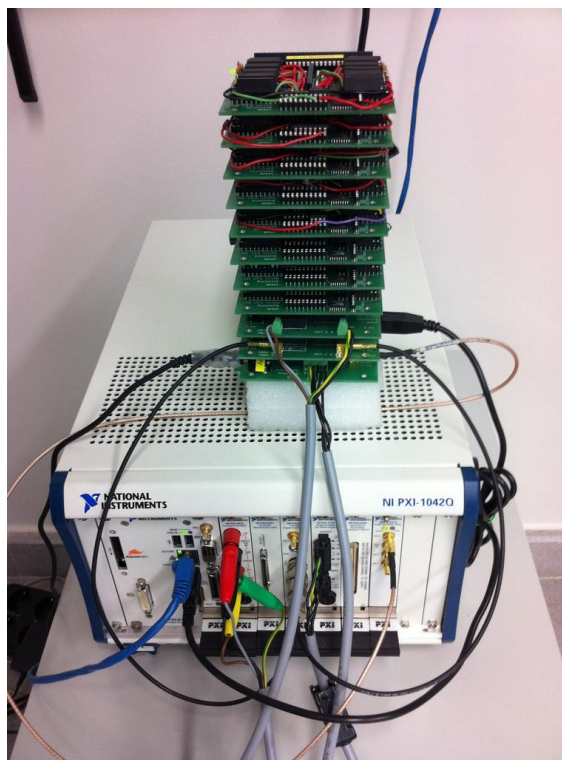


Рис. 4.6. Зовнішній вигляд системи VISIR [138]

В роботі [137] яка була опублікована у 2011 році, розкрито плани зі створення *VISIR Open Lab Platform 5.0*, яка має підтримувати федерацію і репозиторії для розповсюдження навчальних матеріалів. Запропонована архітектура платформи складається з двох хмар: відкритого репозиторію навчальних матеріалів та мережі онлайн лабораторій, що базуються на VISIR 5.0. Метою такої архітектури є створення можливості взаємодії університетів та інших навчальних закладів між собою шляхом спільного використання дистанційних лабораторій.

Дистанційні лабораторії у системі Framework for remote experiments in education. Іншою системою є *FREE* (Framework for remote experiments in education) [139], побудована з використанням Python, Django.

Архітектура цієї системи збігається з тією, що зображена на рис. 4.1, включаючи підтримку відеозображення.

Аналогічно до *WebLabDeusto* та *LabDiscoveryEngine*, дана система вимагає від розробників нової лабораторії лише написання клієнтської частини по взаємодії з експериментом та серверу, який реалізує певний HTTP інтерфейс. Таким чином, система є досить гнучкою та легкою в розвитку і розробці.

Система підтримує можливість інтеграції з деякими системами авторизації, наприклад з Google та Microsoft шляхом використання протоколу OAuth, а також з LMS.

З точки зору конфігурації, *FREE* використовує принципово інший у порівнянні з іншими системами підхід, оскільки в ній блоки контролю самостійно «реєструються» на лабораторному сервері, а не лабораторний сервер конфігурують так, щоб він «знав» про існування блоків контролю по конкретних IP-адресах. Такий підхід дає додаткову зручність у конфігурації, але може нести за собою проблеми з безпекою.

Суттєвою відмінністю від *WebLabDeusto* та *LabDiscoveryEngine* є те, що в архітектурі *FREE* весь трафік від користувача до блоку контролю проходить через лабораторний сервер, при цьому останній ці дані ніяк не інтерпретує, а слугує лише як проксі-сервер. З одного боку це дає можливість зберігати всі дані про виконані студентами експерименти централізовано, а з іншого – збільшує навантаження на мережу та підвищує мережеву затримку між користувачем та експериментом. Також, судячи з опису в [139], для реалізації потоку даних від блоку керування до користувача використовується підхід в якому користувацький застосунок періодично опитує лабораторний сервер для отримання актуальних даних, що, в свою чергу, може мати негативний вплив на експерименти, для яких важливе виконання у реальному часі, тобто, ті, де швидкість оновлення даних та їх актуальність є важливими, як, наприклад, в системах з використанням осцилографа.

Система реалізує власний набір API для взаємодій «клієнт – лабораторний сервер» та «лабораторний сервер – блок контролю взаємодій», який містить мінімально достатню функціональність для роботи дистанційної лабораторії, але має обмеження щодо обміну даними між користувацьким застосунком та блоком контролю, описані вище.

Дистанційні лабораторії у системі edrys-Lite. Edrys-Lite [110] це браузерна платформа дистанційних лабораторій, розроблена в Технічному університеті Фрайберзької гірничої академії (TU Bergakademie Freiberg, Німеччина) в рамках проєкту CrossLab. Система демонструє радикальний архітектурний підхід, який

повністю усуває серверну інфраструктуру.

Ключовою технологічною особливістю edrys-Lite є використання WebRTC (Web Real-Time Communication) для прямих peer-to-peer з'єднань між браузерами без необхідності центрального сервера. Для синхронізації даних у реальному часі між усіма учасниками використовуються безконфліктні репліковані типи даних (CRDT, Conflict-free Replicated Data Types) на базі бібліотеки Yjs, що гарантує консистентність даних без централізованого координатора. Якщо пряме WebRTC-з'єднання неможливе через обмеження NAT або брандмауерів, система передбачає резервне підключення через легковісний WebSocket-ретранслятор, який може бути розгорнутий викладачем самостійно.

Архітектура edrys-Lite побудована на модульному принципі: лабораторія є колекцією модулів, кожен з яких являє собою HTML-сторінку, завантажену в iframe. Модулі взаємодіють між собою через API edrys.js, що забезпечує обмін повідомленнями в реальному часі. Наявні модулі включають колаборативний редактор коду, термінал для компіляції та завантаження коду на мікроконтролери, відеотрансляцію через камеру, Markdown-модуль для інструкцій, дошку для малювання та модуль для симуляцій. Конфігурації лабораторій зберігаються у простих файлах формату JSON або YAML, які можуть розміщуватися на GitHub для спільного доступу.

Система не потребує встановлення серверного програмного забезпечення (окрім специфічних випадків, коли адміністратор бажає розгорнути щось, наприклад рухtermjs, як Docker-контейнер), баз даних чи будь-яких додаткових залежностей. Для підключення до фізичного обладнання, використовуються нативні API сучасних браузерів, такі як WebSerial, WebUSB, та WebBluetooth, також використовується рухtermjs та інші механізми. Платформа є повністю відкритою (вихідний код доступний на GitHub) та була апробована протягом зимових семестрів 2023/24 та 2024/25 зі студентами спеціальності комп'ютерні науки на трьох лабораторних станціях для курсу вбудованих систем.

Edrys-lite використовує концепцію «станцій» (stations) для підключення до реального обладнання. Станція це екземпляр edrys-Lite, відкритий у браузері в

«режимі станції», залишений відповідати на запити студентів. Станції можуть працювати на будь-якій машині з браузером (сервер, ноутбук, Raspberry Pi тощо).

Водночас, безсерверна P2P-архітектура має ряд суттєвих обмежень для застосування в дистанційних лабораторіях, зокрема силовій електроніки. По-перше, система не має вбудованого механізму черги користувачів або бронювання часових слотів, а ця функціональність потрібна для спільного використання обладнання декількома користувачами. По-друге, відсутня інтеграція з системами керування навчанням (LMS) через стандарт LTI, що ускладнює використання в інституційному освітньому середовищі. По-третє, автентифікація практично відсутня – контроль доступу реалізується лише через передачу посилання (хоча викладач може обмежити конкретні ID користувачів, які можуть робити зміни, але спостерігати можуть всі). Будь-хто, хто отримає URL лабораторії, може приєднатися. Для порівняння, LabDiscoveryEngine забезпечує повноцінну систему логін/пароль з сесіями, чергами доступу до обладнання, та інтеграцією через LTI з LMS. В-четверте, P2P-з'єднання є менш надійними за серверні, оскільки залежать від стабільності з'єднання кожного учасника, а відсутність центрального сервера ускладнює централізоване збереження даних про проведені експерименти.

Таким чином, розглянуті технології мають як переваги, так і недоліки, тому для вибору найбільш оптимальної технології необхідно розробити метод порівняння та, відповідно до неї, провести порівняльний аналіз.

4.2 Метод порівняння технологій дистанційних лабораторій

Задля порівняння систем між собою, створено наступний метод порівняння інформаційних технологій дистанційних лабораторій.

1. *Вибір вагових коефіцієнтів та розрахунок інтегрального показника технології.* Наступна формула використовується для розрахунку інтегрального показника інформаційної технології дистанційних лабораторій, за яким буде відбуватися порівняння:

$$X = \sum_{i=1}^N k_i \cdot x_i, \quad (4.1)$$

де X – значення інтегрального показника інформаційної технології

дистанційних лабораторій, чим більше значення, тим кращою є технологія;

x_i – оцінка i -го критерію порівняння за п'ятибальною шкалою з N загальних, де 1 – найнижча оцінка, 5 – найвища;

k_i – ваговий коефіцієнт i -го критерію порівняння в діапазоні від 0 до 1, з дотриманням умови, що сума всіх вагових коефіцієнтів дорівнює 1, тобто, максимальне значення інтегрального показника для будь-яких комбінацій вагових коефіцієнтів складатиме 5:

$$\sum_{i=1}^N k_i = 1. \quad (4.2)$$

Очевидно, що вагові коефіцієнти, які мають значення більше ніж $1/N$, є більш важливими, ніж ті, які мають менше за середнє ($1/N$) значення.

2. *Вибір найкращої технології дистанційних лабораторій.* На цьому етапі здійснюється порівняння отриманих значень інтегральних показників та вибір технології, для якої це значення буде максимальним.

Порівняльний аналіз інформаційних технологій дистанційних лабораторій. Для порівняння використовуються наступні шість критеріїв $[x_1 \dots x_6]$ з відповідними ваговими коефіцієнтами $[k_1 \dots k_6]$:

1. *Рівень технологій, x_1 .* Даний критерій враховує те, наскільки використані мови програмування, системи керування базами даних тощо, є актуальними та підтримуються на час написання даної роботи. Ваговий коефіцієнт $k_1=0,15$.

2. *Оновлення та підтримка, x_2 .* Даний критерій характеризує рівень оновлюваності і підтримки технології її розробниками. Ваговий коефіцієнт для цього критерію обрано вище середнього – $k_2=0,2$, оскільки відсутність оновлень або закінчення розвитку технології може призвести до проблем з працездатністю дистанційної лабораторії, у випадку оновлень інших компонентів системи.

3. *Можливість інтеграції з LMS, x_3 .* Цей критерій відображає рівень підтримки інтеграції з LMS самою технологією, він є досить важливим ($k_3=0,2$), оскільки доступ до дистанційної лабораторії з середовища LMS суттєво спрощує оцінювання виконаної роботи викладачем та загалом підвищує якість освітнього процесу.

4. *Простота, x_4 .* Цей критерій враховує кількість «діючих осіб» в системі та

рівень складності їх взаємодії один між одним. Ваговий коефіцієнт $k_4=0,1$, оскільки простота технології важлива лише на початку розробки, і не впливає на кінцевий функціонал дистанційної лабораторії.

5. *Швидкодія в real-time режимі*, x_5 . Даний критерій відображає те, наскільки архітектура системи добре підходить під real-time експерименти, і є найважливішим для даного випадку ($k_5=0,25$), оскільки технології аналізуються з точки зору їх використання для розробки дистанційних лабораторій для спеціальностей електронного спрямування, де спостереження за формою сигналів та взаємодія в режимі реального часу є критично важливо

6. *Простота конфігурації*, x_6 . Цей критерій характеризує рівень простоти налаштування системи дистанційної лабораторії з використанням обраної технології, ваговий коефіцієнт $k_6=0,1$, оскільки як і у випадку з 4 критерієм, він є важливим лише на початку розробки, і не впливає на кінцевий результат та якість розробленої лабораторії.

Варто відзначити, що наведені вагові коефіцієнти та критерії обиралися з точки зору їх застосування для порівняння технологій дистанційних лабораторій для спеціальностей електронного спрямування, у випадку фокусу на інші спеціальності, як вагові коефіцієнти, так і перелік критеріїв може бути іншим, для чого потрібно робити додаткове дослідження.

4.3 Апробація методу порівняння технологій дистанційних лабораторій

Виходячи з інформації, наведеної вище, було проаналізовано інформаційні технології дистанційних лабораторій за запропонованим методом порівняння: встановлено значення показників критеріїв x_i за методом експертної оцінки, та порівняно отримані значення розрахованого інтегрального показника. Найбільш важливі пояснення для кожної технології наведені нижче.

WebLabDeusto використовує застарілу версію Python, через що рівень технологій оцінений в 3 ($x_1=3$). Також, дана система більше не підтримується, тому критерій «оновлення та підтримка» оцінено за мінімумом ($x_2=1$). Через необхідність вказування IP адрес у файлі з форматом YAML, що дещо ускладнює конфігурацію

системи, критерій «простота конфігурації» оцінений в 4 бали ($x_6=4$). Всі інші критерії оцінені максимально.

На відміну від *WebLabDeusto*, технологія *LabDiscoveryEngine* використовує нову версію Python, наразі підтримується і розвивається, але має такий самий підхід щодо конфігурації системи, тому вона має оцінку $x_6=4$ також, в той час, як всі інші критерії оцінені максимально.

VISIR Open Lab Platform 5.0 має складну систему інтеграцій, через що критерій «простота» оцінений як 2 ($x_4=2$). Крім цього, технології, застосовані у ній, є застарілими (Adobe Flash, PHP тощо), тому критерій «рівень технологій» $x_1=1$, а оновлення технології відсутні ($x_2=1$). Для конфігурації необхідне додаткове високовартісне обладнання виробництва компанії National Instruments, тому критерій «простота конфігурації» також оцінений мінімально ($x_6=1$).

Система *iLab* використовує застарілі технології ($x_1=1$), більше не підтримується ($x_2=1$), не має інтеграції з LMS (окрім підходів інтеграції «ззовні» власноруч, $x_3=1$), а також має забагато розподілених компонентів в системі, через що критерій «простота» був оцінений в 3 бали ($x_4=3$).

У системи *FREE* лабораторний сервер слугує як проксі, через який проходять всі запити до блоку контролю, що створює додаткову складність ($x_4=4$), а також негативно впливає на швидкодію в real-time режимі ($x_5=3$).

Система *edrys-Lite* має високий рівень технологій ($x_1=5$), є активним проєктом, однак ще недостатньо розповсюдженим, а також оригінальний проєкт edrys (серверна версія) вже не підтримується, що створює ризик повторення долі попередника ($x_2=4$), повністю відсутня інтеграція з LMS ($x_3=1$), а також існує складність, що пов'язана з тим, що P2P-зв'язок досить часто не є стабільним, що вимагає від системи встановлення додаткових механізмів зв'язку, таких як WebSocket-ретрансляторів ($x_4=4$).

Результати порівняння відображені в таблиці 4.1.

Порівняльна таблиця інформаційних технологій дистанційних лабораторій за запропонованим методом порівняння

Технологія	Рівень технологій k_1x_1	Оновлення та підтримка k_2x_2	Можл. інтегр. з LMS k_3x_3	Простота k_4x_4	Швидкість в real-time режимі k_5x_5	Простота конфігурації k_6x_6	Інтегральний показник X
WebLab Deusto	0,15*3 =0,45	0,2*1 =0,2	0,2*5 =1,0	0,1*5 =0,5	0,25*5 =1,25	0,1*4=0,4	3,8
Lab Discovery Engine	0,15*5 =0,75	0,2*5 =1,0	0,2*5 =1,0	0,1*5 =0,5	0,25*5 =1,25	0,1*4=0,4	4,9
VISIR 5.0	0,15*1 =0,15	0,2*1 =0,2	0,2*5 =1,0	0,1*2 =0,2	0,25*5 =1,25	0,1*1=0,1	2,9
iLab	0,15*1 =0,15	0,2*1 =0,2	0,2*1 =0,2	0,1*3 =0,3	0,25*5 =1,25	0,1*3=0,3	2,4
FREE	0,15*5 =0,75	0,2*5 =1,0	0,2*5 =1,0	0,1*4 =0,4	0,25*3 =0,75	0,1*5=0,5	4,4
edrys-Lite	0,15*5 =0,75	0,2*4 =0,8	0,2*1 =0,2	0,1*4 =0,4	0,25*5 =1,25	0,1*5=0,5	3,9

Результат аналізу. Як видно з результатів, наведених у таблиці 4.1, технології *iLab* та *VISIR* отримали найнижчий інтегральний показник, і не рекомендуються, у випадку розробки нових дистанційних лабораторій. Технологія *WebLabDeusto* в цілому має досить високий інтегральний показник, однак, її використання вже не доцільне, оскільки всі її переваги повторюються у новій технології *LabDiscoveryEngine*, яка також має й додаткові переваги. Технологія *FREE* має високий інтегральний показник, і може бути рекомендована у тому випадку, якщо вимога реального часу не є пріоритетною. Також технологія *edrys-Lite* має високий показник, але великим недоліком є відсутність авторизації, а також відсутність можливості зберігати дані про проведені експерименти централізовано. Найвищий інтегральний показник має технологія *LabDiscoveryEngine*, яка увібрала в себе всі напрацювання за останні роки, й саме вона рекомендується як найкраща для нових розробок дистанційних лабораторій.

4.4 Висновки до розділу 4

У даному розділі отримали подальший розвиток технологічні підходи до формування архітектури дистанційних інженерних лабораторій шляхом розроблення та апробації методу багатокритеріального порівняльного аналізу інформаційних технологій їх побудови, що забезпечує обґрунтований вибір технологічної платформи верифікації діагностичної системи напівпровідникових перетворювачів електроенергії.

Основні результати розділу полягають у наступному:

1. Запропоновано формалізований метод порівняння інформаційних технологій дистанційних лабораторій електронного обладнання, який, на відміну від існуючих підходів, що обмежуються якісним описом окремих платформ, забезпечує кількісне зіставлення технологій на основі інтегрального показника, обчисленого як зважена сума оцінок за системою критеріїв. Метод усуває виявлену в літературному огляді прогалину, пов'язану з відсутністю уніфікованого підходу до порівняння технологій дистанційних лабораторій, на яку вказують численні систематичні огляди.
2. Запропоновано систему з шести критеріїв порівняння з обґрунтованими ваговими коефіцієнтами, орієнтовану на специфіку дистанційних лабораторій електронного спрямування: рівень технологій, оновлення та підтримка, можливість інтеграції з LMS, простота архітектури, швидкодія в режимі реального часу та простота конфігурації. Найбільший ваговий коефіцієнт присвоєно критерію швидкодії в режимі реального часу, що відображає важливість цього параметра для лабораторій силової електроніки, де спостереження за формою сигналів та взаємодія з перетворювачем вимагають мінімальної затримки передачі даних.
3. На основі запропонованого методу проведено систематичне порівняння шести поширених технологій дистанційних лабораторій: WebLabDeusto, LabDiscoveryEngine, VISIR Open Lab Platform 5.0, iLab Shared Architecture, FREE та edrys-Lite, за єдиною кількісною шкалою. Результати порівняння показали, що технологія LabDiscoveryEngine має найвищий інтегральний

показник, що зумовлено використанням актуального програмного стеку, активною підтримкою розробниками, повноцінною інтеграцією з LMS, архітектурною простотою та придатністю для експериментів реального часу. Таким чином, створено підґрунтя для переходу від емпіричного до науково аргументованого проєктування архітектури інформаційних систем, орієнтованих на роботу з цифровими двійниками електронного обладнання.

Практичне значення отриманих результатів визначається тим, що запропонований метод має універсальний характер і може бути адаптований для інших предметних галузей шляхом модифікації переліку критеріїв та їхніх вагових коефіцієнтів. Зокрема, для дистанційних лабораторій з фокусом на хімічні, фізичні або механічні експерименти можуть бути введені додаткові критерії, такі як підтримка відеотрансляції, можливість роботи з небезпечними речовинами або інтеграція з CAD-системами, із відповідним перерозподілом вагових коефіцієнтів.

Результатом використання методу є обґрунтований вибір LabDiscoveryEngine як базової технології, яка безпосередньо використовується в інших розділах даної роботи при побудові дистанційної лабораторії для верифікації діагностичної системи перетворювача постійного струму на основі цифрового двійника. Обрана технологія забезпечує інфраструктуру для реалізації ключових вимог дисертаційного дослідження: збору експериментальних даних з реального перетворювача в режимі реального часу та дистанційного керування параметрами перетворювача постійного струму.

Основні результати розділу опубліковано в працях [148, 152, 154, 155]

РОЗДІЛ 5. Експериментальна частина

У попередніх розділах дисертації було послідовно розроблено теоретичні та методологічні засади дослідження. Даний розділ присвячено експериментальній валідації сукупності розроблених методів та технологій. Експериментальна частина має подвійну мету. По-перше, продемонструвати практичну реалізацію програмно-апаратного комплексу дистанційної лабораторії силової електроніки, що інтегрує цифровий двійник для діагностики перетворювачів постійного струму. По-друге, верифікувати працездатність методу діагностики на реальному обладнанні в умовах, наближених до реальної експлуатації, включаючи шуми вимірювань, неточності обладнання та паразитні ефекти.

Структура розділу побудована наступним чином. У підрозділі 5.1 описано програмно-апаратний комплекс дистанційної лабораторії силової електроніки: склад лабораторного обладнання, архітектуру системи, взаємодію між компонентами, а також технологічні рішення, що були прийняті при розробці серверної частини системи. У підрозділі 5.2 наведено результати тестування методу діагностики на реальному понижуючому перетворювачі постійного струму (систему якого описано в підрозділі 5.1) із цілеспрямованим внесенням контрольованих відхилень параметрів та аналізом коректності спрацювання алгоритму. Підрозділ 5.3 містить інформацію про аналіз та тестування швидкодії розробленої системи. У підрозділі 5.4 створено марковську модель готовності перетворювача постійного струму, і на ній доведено підвищення ефективності діагностування через зростання коефіцієнта готовності.

5.1 Опис системи

У даному підрозділі описано програмно-апаратний комплекс дистанційної лабораторії силової електроніки, розроблений на базі технології LabDiscoveryEngine, обраної за результатами порівняльного аналізу, наведеного в розділі 4. Комплекс забезпечує віддалений доступ до реального обладнання та є технологічною основою для експериментальної верифікації методу діагностики, представленого в розділі 2.

5.1.1 Лабораторія сигової електроніки

Лабораторія, що підлягає «дистанціюванню» в рамках проекту, є лабораторією сигової електроніки, яка складається з двох експериментів із перетворювачами постійного струму: понижуючого (buck) та підвищуючого (boost) перетворювачів. Принципова схема підвищуючого перетворювача з елементами керування та індикаторами вимірюваних параметрів показана на рис. 5.1. Кожен експеримент складається з наступних компонентів: керованого джерела постійної напруги V_{DC} , що використовується як вхідна напруга для досліджуваної схеми; власне перетворювача, що складається з конденсатора C_1 (вхідний фільтр), індуктивності L_1 (елемент зберігання енергії), силового MOSFET-транзистора Q_1 , керованого широтно-імпульсно модульованим (ШИМ) сигналом, діода VD_1 , набору вихідних фільтрів C_F та навантаження R_{load} .

Студент має можливість змінювати параметри деяких компонентів схеми, зокрема опір навантаження R_{load} , вхідну напругу постійного струму V_{in} , коефіцієнт заповнення (duty cycle) керуючого ШИМ-сигналу D та ємність фільтруючого конденсатора C_F . Слід зазначити, що схема понижуючого перетворювача має інше з'єднання компонентів L_1 , Q_1 та VD_1 , проте принцип роботи є аналогічним, тому в даній роботі детально розглядається лише один експеримент. Другий використовує такий самий підхід до «дистанціювання».

Така конфігурація забезпечує широкий спектр експериментів, зокрема: аналіз впливу навантаження на вихідну напругу, дослідження керуючих характеристик $V_{load}=f(D)$, аналіз впливу пульсацій напруги навантаження як функції ємності фільтруючого конденсатора C_F та опору навантаження R_{load} тощо. Студент може використовувати режим «ручний ШИМ» для встановлення коефіцієнта заповнення D вручну, а також режим «автоматичний ШИМ» для роботи в замкненому контурі керування, коли задається бажана вихідна напруга, а ПІ-регулятор забезпечує стабілізацію вихідної напруги та компенсацію зовнішніх збурень (наприклад, зміни вхідної напруги або опору навантаження).

Для забезпечення повноцінного дослідження роботи перетворювача існуючу лабораторію було модифіковано. Модифікація надала можливості дистанційного

встановлення та дистанційного вимірювання згаданих вище вхідних і вихідних параметрів схеми відповідно, а також візуалізації найважливіших сигналів (керуючого ШІМ-сигналу, вихідної напруги V_{load} та струму фільтруючого конденсатора I_{CF}).

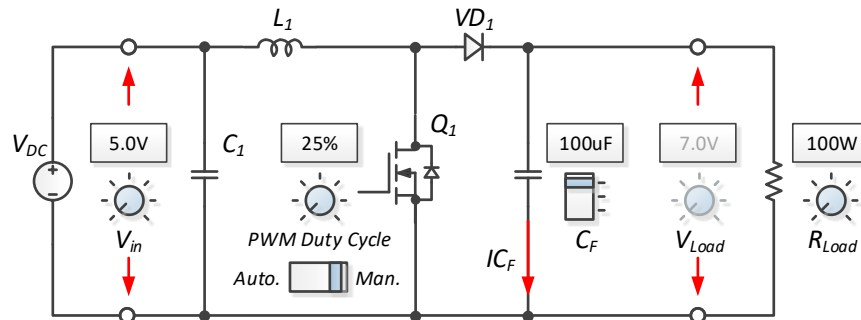


Рис. 5.1. Принципова схема підвищуючого перетворювача постійного струму

5.1.2 Архітектура дистанційної лабораторії

Загальний огляд системи. Загальна архітектура системи показана на рис. 5.2. Архітектура складається з користувача та трьох системних рівнів: системи керування дистанційною лабораторією (Remote Laboratory Management System, RLMS), лабораторно-специфічного програмного забезпечення та електронного обладнання експерименту.

Користувач є програмним компонентом у тому сенсі, що реальний користувач використовує клієнтський додаток (веббраузер) для доступу до системи, взаємодії з електронним обладнанням експерименту та проведення експерименту відповідно до навчальних матеріалів та методичних вказівок.

Система керування дистанційною лабораторією (RLMS) забезпечує базову функціональність системи: керування користувачами, автентифікацію, авторизацію та формування черги доступу.

Лабораторно-специфічне програмне забезпечення реалізує всю логіку, необхідну для функціонування саме цієї дистанційної лабораторії силової електроніки. Воно забезпечує комунікацію з електронним обладнанням експерименту та користувачем, збір даних та керування бажаними параметрами експерименту.

Електронне обладнання експерименту поєднує два компоненти: друковані

плати (PCB) силової електроніки та мікроконтролерний блок (MCU) на базі STM32 для взаємодії з платами, зокрема для встановлення вхідних параметрів (напруг, опорів, ємностей) та зчитування вихідних значень.

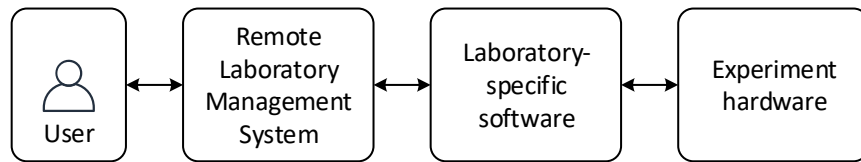


Рис. 5.2. Архітектура дистанційної лабораторії силової електроніки

Дана схема відповідає загальній архітектурі дистанційних лабораторій, описаній у розділі 4, з однією відмінністю: блоки порталу та глобального керування об'єднані в блок RLMS, тоді як блок керування експериментом розділено на лабораторно-специфічне програмне забезпечення та електронне обладнання експерименту. Таке перекомпонування будівельних блоків програмної системи є зручним для описаної системи з огляду на спосіб проєктування та реалізації проєкту, а також структуру команди розробників. Фокусом даного підрозділу є інформаційна технологія серверної частини (бекенду) дистанційної лабораторії, показана на рис. 5.2 як «Лабораторно-специфічне програмне забезпечення».

Деталі системи та взаємодія з користувачем. На рис. 5.3 наведено більш детальну схему системи, в якій блок «Лабораторно-специфічне програмне забезпечення» з «Лабораторним сервером» слід розглядати як центральний компонент, що реалізує серверну частину лабораторії. На рисунку показано, що клієнтська сторона (Користувач) може взаємодіяти безпосередньо як із сервером RLMS, так і з Лабораторним сервером. Така взаємодія відбувається наступним чином:

1. Користувач авторизується на порталі RLMS, розташованому на сервері, та обирає бажану лабораторію.
2. (Опціонально) RLMS формує чергу користувачів у разі обмеженої кількості апаратних екземплярів експерименту.
3. RLMS ініціалізує нову сесію, звертаючись до відповідної кінцевої точки HTTP API Лабораторного сервера.
4. RLMS перенаправляє користувача на IP-адресу або URL Лабораторного

сервера.

5. Впродовж усього часу сесії користувач взаємодіє з Лабораторним сервером безпосередньо.

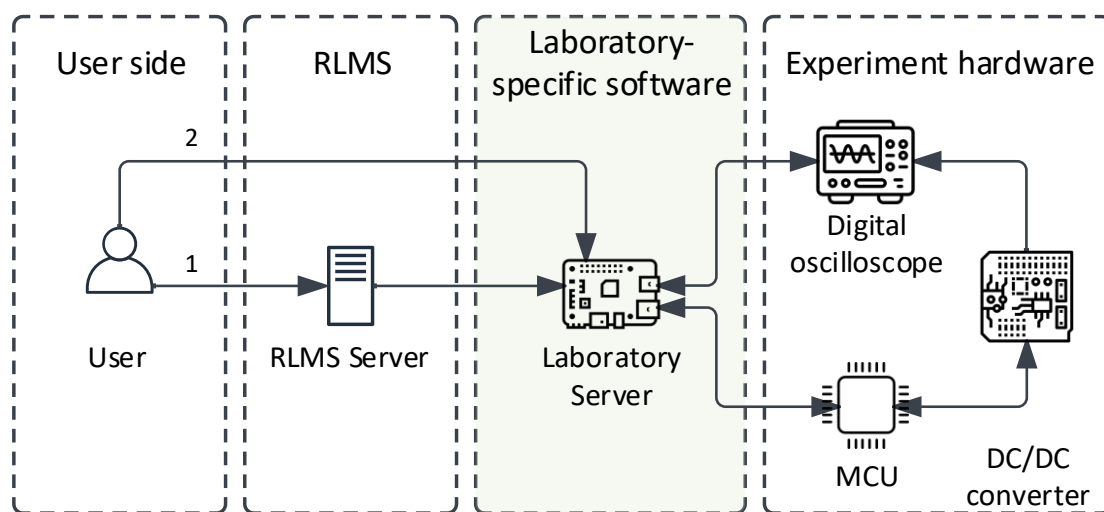


Рис. 5.3. Детальна схема системи дистанційної лабораторії сигової електроніки

Кожна лабораторія має власне обмеження часу сесії. Якщо користувач не завершує сесію вручну до закінчення відведеного часу, система примусово відключає його від лабораторії. Коли RLMS виявляє, що сесію необхідно завершити, він звертається до відповідного API Лабораторного сервера. Після завершення сесії Лабораторний сервер перенаправляє користувача назад на сторінку порталу RLMS, що забезпечує плавний та безперервний досвід використання. Слід зазначити, що користувач взаємодіє безпосередньо лише з двома згаданими серверами і не має прямого з'єднання з електронним обладнанням експерименту.

Електронне обладнання дистанційної лабораторії. Окрім програмних компонентів, важливу роль відіграють апаратні складові системи. Raspberry Pi 4 обрано як апаратну платформу для Лабораторного сервера завдяки широкому набору дротових комунікаційних інтерфейсів (USB, SPI, I2C тощо), що є важливим для комунікації з електронним обладнанням експерименту. Електронне обладнання експерименту складається з наступних компонентів: багатофункціональний вимірювальний прилад Analog Discovery 2, під'єднаний до Лабораторного сервера через USB-інтерфейс, використовується як цифровий осцилограф з двома каналами вимірювання. Ці два канали вимірюють напругу та струм у понижуючому та

підвищуючому перетворювачах, зібраних на спеціально розроблених друкованих платах. Вимірювання статичних значень вхідної та вихідної напруги, а також зміна опору навантаження, коефіцієнта заповнення та ємності фільтра перетворювачів здійснюються через плату MCU на базі мікроконтролера STM32, оснащеного аналого-цифровими перетворювачами. Між MCU та Лабораторним сервером існує двонаправлений потік даних: виміряні дані після обробки в STM32 передаються до Лабораторного сервера, а керуючі команди для зміни параметрів досліджуваного перетворювача передаються у зворотному напрямку – від Raspberry Pi до MCU.

5.1.3 Реалізація інформаційної технології бекенду дистанційної лабораторії

Архітектура програмного коду. Архітектура програмного коду бекенду показана на рис. 5.4. Вона базується на класичному багатошаровому підході та складається з трьох шарів: шару збереження даних (persistence layer) для взаємодії з базою даних та зберігання необхідної інформації; бізнес-шару (business layer) для реалізації бізнес-логіки дистанційної лабораторії; інтерфейсного шару (interface layer) для реалізації взаємодії з користувачем, сервером RLMS та електронним обладнанням лабораторії. Слід зазначити, що на рис. 5.4 показано не всі, а лише найбільш важливі варіанти використання (use cases). З урахуванням того, що інформація про користувача зберігається в базі RLMS LDE, шар збереження даних містить лише тимчасові дані експерименту та лічильник тайм-ауту сесії.

Архітектура побудована на основі відомих патернів чистої архітектури (Clean Architecture) та гексагональної архітектури (Hexagonal Architecture) з основною ідеєю «вертикальних» блоків бізнес-шару, що називаються «варіантами використання» (use cases). Такий підхід робить архітектуру легшою для підтримки, тестування та розширення.

Взаємодія Лабораторного сервера з RLMS. Сервер RLMS відповідає за задачі керування, основними серед яких є: створення користувачів; керування ролями та дозволами користувачів; планування лабораторних сесій та керування чергами користувачів; відстеження статусів сесій та ініціювання їх завершення за потреби.

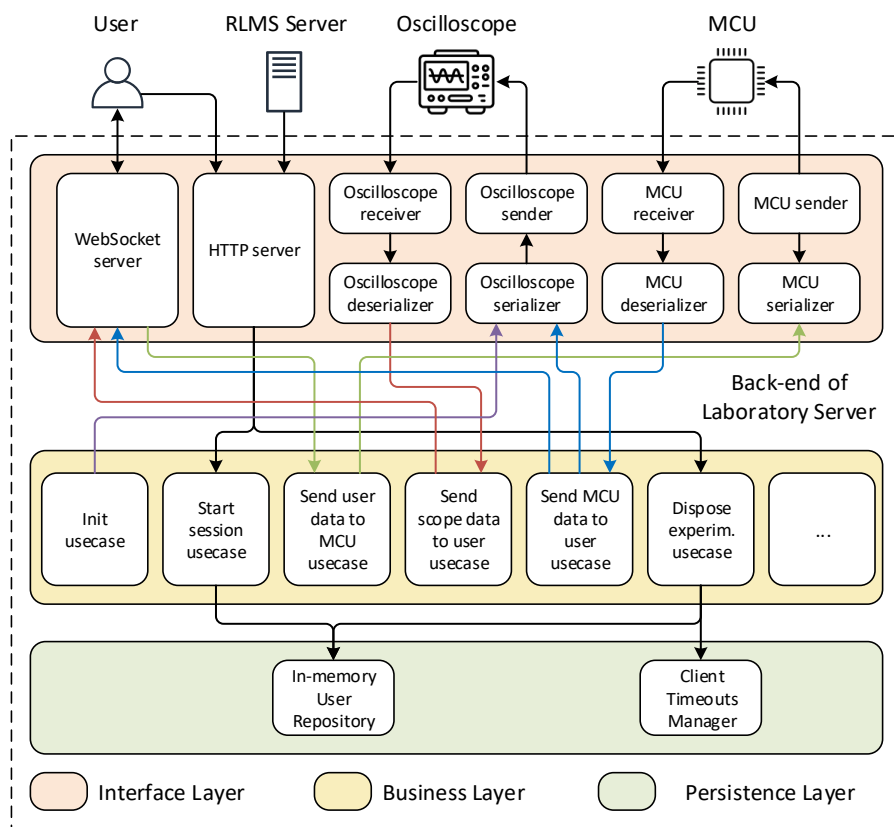


Рис. 5.4. Архітектура програмного коду бекенду

Виходячи з аналізу, проведеного в розділі 4, LabDiscoveryEngine було обрано як RLMS для дистанційної лабораторії сигової електроніки, проте для Лабораторного сервера було розроблено нову технологію бекенду на основі документації WebLabDeusto та вихідного коду LabDiscoveryLib, який слугував прикладом інтеграції Лабораторного сервера.

Вибір технології бекенду для Лабораторного сервера. По-перше, оскільки основним завданням Лабораторного сервера в проєкті є інтеграція з LabDiscoveryEngine та безпечна передача даних між клієнтом та електронним пристроєм без потреби у складних та тривалих обчисленнях (CPU-інтенсивних задачах), при одночасній наявності великої кількості операцій введення-виведення, технологія бекенду повинна мати неблокуючу модель введення-виведення.

По-друге, апаратною платформою для бекенду є плата Raspberry Pi, що, в свою чергу, накладає обмеження на доступну обчислювальну потужність. По-третє, технологія має бути популярною та поширеною, оскільки це забезпечує наявність великої кількості інструментів з кращою підтримкою та функціональністю.

Для вибору найбільш відповідної технології було порівняно кілька популярних технологій бекенду: Python-фреймворки Django та Flask, Java-фреймворк Spring, Ruby on Rails, PHP-фреймворк Laravel та Node.js. Всі критерії оцінювалися за шкалою від 1 до 5, де 1 – найнижча оцінка (дуже погано, дуже низько), 5 – найвища оцінка (дуже добре, відмінно). Результати порівняння наведено в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1

Порівняння технологій бекенду

Технологія	Неблокуюче I/O	Ресурсо-ефективність	Популярність	Загалом
Python (Django/Flask)	Обмежено (asyncio, 2)	Середня (GIL, 3)	Дуже висока (5)	10
Java (Spring)	Добре (NIO, 4)	Середня (3)	Висока (4)	11
Ruby on Rails	Обмежено (блокуюче I/O, 2)	Середня (3)	Середня (3)	8
PHP (Laravel)	Обмежено (блокуюче I/O, 2)	Висока (4)	Висока (4)	10
JavaScript (Node.js)	Відмінно (event-driven архітектура, 5)	Висока (4)	Дуже висока (5)	14

На основі порівняння, Node.js було обрано як базову технологію бекенду завдяки його асинхронній природі з неблокуючим I/O, легкій архітектурі та менеджеру пакетів з понад 17 мільйонами користувачів по всьому світу. Крім того, JavaScript (та TypeScript) є мовою, що виконується Node.js, що надає команді розробників можливість спільного використання коду між бекендом та фронтом. Таким чином, HTTP API для взаємодії з LabDiscoveryEngine було реалізовано з нуля на Node.js, який, як видно з таблиці 5.1, є найбільш відповідною технологією для бекенду у даному випадку використання.

Принцип зберігання даних у пам'яті. Документація LabDiscoveryLib рекомендує використовувати так звані задачі (tasks) на основі Redis для досягнення одночасності (concurrency), оскільки інструмент побудований на Python та Flask за

патерном MVC. Завдяки асинхронній природі технології Node.js потреба в такому підході до досягнення одночасності відпадає.

Незважаючи на те, що більшість сучасних бекенд систем використовують системи керування базами даних для збереження даних, дана система спроектована з основним принципом: Лабораторний сервер не має зберігати нічого на диску. Якщо щось трапиться з Лабораторним сервером і він вийде з ладу або буде перезавантажений, краще обробити такі випадки так, ніби Лабораторний сервер завантажився вперше. По-перше, такий підхід суттєво зменшує складність системи. По-друге, це є доцільним, оскільки найбільш вірогідною причиною перезавантаження Лабораторного сервера є відключення електроенергії, яке, в свою чергу, впливає на електронне обладнання таким самим чином, примусово скидаючи всі фізичні властивості (коефіцієнти заповнення ШІМ, напруги та струми) до початкових значень.

Таким чином, потреба в механізмі збереження даних у системі відсутня. Єдине, що потребує зберігання – це інформація про активного та неактивних користувачів протягом певного часу, але обсяг даних є досить малим (порядку 100 байт на користувача), тому вони зберігаються в оперативній пам'яті додатка, як показано на рис. 5.4. Крім того, такий підхід зменшує операційну складність системи.

Взаємодія з клієнтом. Як зазначено в літературі, багато задач в інформатиці можуть бути інтерпретовані як задача мультилідерної реплікації (Multi-Leader Replication) та вирішені з використанням відповідних моделей. У системі дистанційної лабораторії електронного обладнання подібна задача виникає в момент надсилання фізичних значень для встановлення в електронному пристрої через UI (клієнтський додаток). Це відбувається тому, що реальне фізичне значення, що встановлене в електронному пристрої, не гарантовано є повністю рівним значенню, наданому користувачем. Крім того, реальне значення встановлюється з деякою затримкою після надсилання користувачем через мережеву затримку, затримку обробки та інерційність реальних апаратних компонентів.

Таким чином, виникає задача надання користувачеві інтерфейсу, який дозволяє одночасно бачити бажані та реальні значення. У даному проєкті задачу було вирішено

шляхом роздільного відображення двох значень: введене користувачем значення представлене як поле введення, що може бути модифіковане, поруч з яким відображається значення, отримане від електронного пристрою. Бекенд спроектовано відповідним чином.

Окрім того, реальні фізичні значення в електронному пристрої можуть змінюватися незалежно від введення користувача через флуктуації напруг, струмів тощо. Ця задача призводить до необхідності підтримання UI в актуальному стані з обладнанням у режимі реального часу. Для забезпечення двонаправленої комунікації було обрано протокол WebSocket. Цей протокол усуває необхідність реалізації опитування клієнтом сервера за допомогою стандартних HTTP-запитів, що зменшує затримки та мережеве навантаження шляхом зменшення кількості переданих TCP-пакетів.

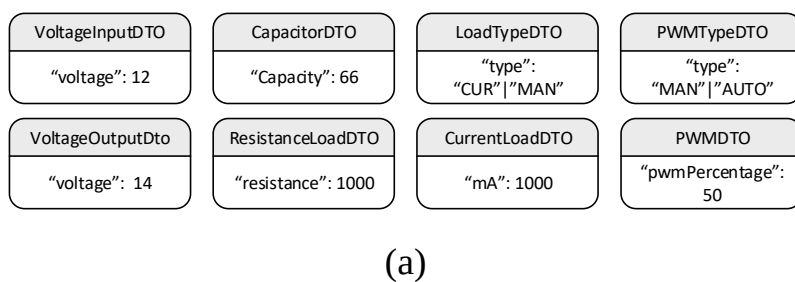
Таким чином, бекенд реалізує WebSocket-сервер, що пересилає нові реальні фізичні значення, що встановлені в електронному пристрої, користувачеві. Також, як показано на рис. 5.3, система містить цифровий осцилограф, який повинен періодично використовуватися для отримання часових діаграм напруги та струму та надсилання даних клієнту. Протокол WebSocket використовується і для цієї задачі.

Користувацький протокол прикладного рівня. Як було зазначено вище, WebSocket обрано як комунікаційний протокол, що дозволяє серверу надсилати дані клієнту за власною ініціативою, без необхідності очікування HTTP-запиту від клієнта. Для потреб проекту було розроблено користувацький протокол прикладного рівня, побудований поверх WebSocket. Цей протокол дозволяє і клієнту, і серверу кодувати та декодувати дані однаково для взаємного розуміння.

Ключовим принципом запропонованого протоколу є те, що при передачі одного й того самого доменного об'єкта (наприклад, вхідної напруги) повідомлення виглядає однаково як при передачі від клієнта до сервера, так і у зворотному напрямку. Єдине, що відрізняється – це напрямок передачі. Наприклад, коли сервер надсилає об'єкт «OutputVoltage», він відображається на UI як реальне значення, але коли клієнт надсилає такий самий об'єкт, сервер інтерпретує його як значення, що потрібно встановити на електронному обладнанні. Це справедливо для майже всіх об'єктів

передачі даних (DTO), що використовуються в системі, за винятком кількох, що працюють лише в напрямку від сервера до клієнта (дані осцилографа та подія завершення сесії).

Кожен об'єкт є JSON-рядком з обов'язковою властивістю «dtoName», яка повідомляє отримувачу, як інтерпретувати повідомлення, та специфічною для об'єкта властивістю, наприклад «voltage» у випадку DTO напруги. На рис. 5.5 показано перелік усіх DTO клієнт-сервер з їхніми назвами та даними, що передаються, а також приклад JSON-представлення DTO значення вихідної напруги.



(b)

```
↑ {"dtoName":"VoltageOutputDto","voltage":5}
```

(b)

Рис. 5.5. DTO клієнт-сервер: графічне представлення (а), JSON-представлення значення вихідної напруги (б)

Патерн Monorepo. Оскільки бекенд та фронтенд використовують TypeScript як мову програмування, для цілей розробки зручно спільно використовувати деякий код між ними. Як описано в даному підрозділі, існує протокол для комунікації клієнт-сервер, і DTO, що використовуються в протоколі, можуть бути легко розподілені між двома частинами, тому було використано патерн Monorepo. Для реалізації патерну обрано інструмент Nx завдяки його підходу з єдиним package.json.

Взаємодія з мікроконтролером. Інтерфейс передачі даних. Як було зазначено вище, система вимагає двонаправленої комунікації для забезпечення оперативного та ефективного оновлення клієнта реальними фізичними значеннями з плати. Водночас, апаратною платформою, на якій працює Лабораторний сервер, є одноплатний комп'ютер Raspberry Pi, що надає можливість використання різних популярних апаратних інтерфейсів: UART, I2C, SPI. З огляду на потребу в двонаправленій

комунікації та не надто високих швидкостях передачі даних, інтерфейс UART було обрано як спосіб передачі даних від сервера до MCU та в зворотному напрямку. Таким чином, оскільки канали комунікації клієнт-сервер та сервер-MCU є двонаправленими, з'єднання клієнт-MCU також може розглядатися як двонаправлене.

Користувацький протокол прикладного рівня для MCU. Протокол прикладного рівня, побудований на основі UART як інтерфейсу передачі даних, аналогічно до DTO через WebSocket, було розроблено для комунікації Лабораторного сервера з MCU. Для спрощення і уникнення перевантаження MCU парсингом JSON-рядків було розроблено простіший формат кодування. Запропонований користувацький протокол має формат, показаний на рис. 5.6.

```
KEY1=VALUE1;KEY2=VALUE2;KEY3=VALUE3;\n
```

Рис. 5.6. Приклад користувацького протоколу повідомлень сервер-MCU

Всі повідомлення складаються з пар ключ-значення, розділених знаком "=". Всі пари ключ-значення, в свою чергу, розділяються знаком ";". Кінець повідомлення позначається символом нового рядка "\n". Таким чином, багато різних доменних значень можуть бути надіслані в одному повідомленні, що зменшує обсяг роботи MCU з парсингу повідомлень. Крім того, протокол є достатньо простим для легкого парсингу.

Комунікація сервер-MCU побудована на основній ідеї періодичного надсилання повідомлень. Це означає, що MCU надсилає ті самі дані (наприклад, вихідну напругу) кожні X секунд. Це забезпечує наступні переваги: відсутність необхідності в опитуванні (сервер може просто очікувати наступний такт синхронізації даних), а повідомлення, надіслане від MCU до сервера, може бути використане як відповідь на запити сервера (якщо сервер надсилає повідомлення для встановлення вихідної напруги на рівні 10 В, він може перевірити, чи було напругу встановлено на бажаний рівень, або потрібно повторити спробу).

Третім ключовим принципом комунікації є розподіл відповідальності в системі. Система спроектована таким чином, що бекенд несе мінімальну відповідальність за комунікацію користувач-MCU і спроектований так, щоб «знати» якомога менше про

фактичне значення всіх доменних даних, що передаються. Це забезпечує кращу повторну використовуваність бекенду для інших можливих типів електронного обладнання в майбутньому, покращуючи загальну масштабованість системи. Список команд, що використовуються в даній комунікації, складається з 10 команд: C (ємність), IL (струм навантаження), VIN (вхідна напруга), LOAD (тип навантаження), VOUT (вихідна напруга), PWM (коефіцієнт заповнення ШІМ), MODE (режим ШІМ), RL (опір навантаження), RESET та ERR.

Легко помітити, що всі команди, окрім двох останніх, відповідають тим самим фізичним величинам, що й DTO клієнт-сервер. Команда RESET необхідна для досягнення розподілу відповідальності в системі: оскільки електронне обладнання має бути скинуте щоразу при завершенні лабораторної сесії, доцільно інкапсулювати всю логіку скидання в одній команді, оскільки таким чином лише MCU є джерелом істини щодо дій, які необхідно виконати для скидання. Команда ERR використовується для непередбачуваних ситуацій, які логуються як текстові файли на сервері.

Взаємодія з цифровим осцилографом. Осцилограф, що використовується в проєкті, є багатофункціональним пристроєм Analog Discovery 2, який має офіційний Python SDK під назвою WaveForms. Оскільки Node.js було обрано як основну технологію бекенду системи, інтеграцію з Analog Discovery 2 було здійснено за допомогою пакету `child_process` Node.js. Таким чином, процес Python, який обробляє всі маніпуляції з осцилографом, створюється як підпроцес Node.js, з усією комунікацією через канали Linux (`stdin`, `stdout`, `stderr`), як показано на рис. 5.7.

Описаний програмно-апаратний комплекс дистанційної лабораторії забезпечує необхідну інфраструктуру для експериментальної верифікації запропонованого методу діагностики. Двонаправлена комунікація між Лабораторним сервером та електронним обладнанням через UART-протокол, а також збір даних за допомогою цифрового осцилографа Analog Discovery 2 надають можливість отримувати в режимі реального часу значення чотирьох ключових показників (середньої напруги, пульсацій напруги, середнього струму, пульсацій струму), необхідних для функціонування алгоритму діагностики на основі таблиці відповідності. У

наступному підрозділі наведено результати тестування методу на цій апаратній базі.

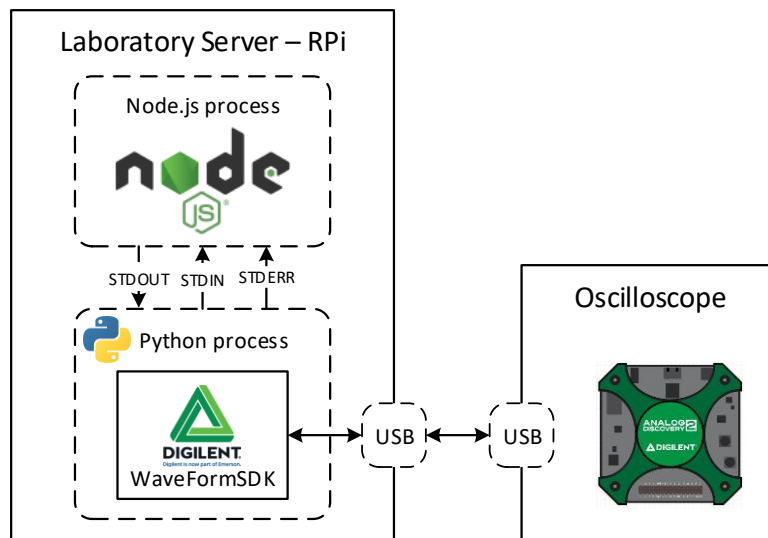


Рис. 5.7. Схема інтеграції Лабораторного сервера з осцилографом

5.2 Тестування точності визначення наявності несправностей та їх причин

Задля перевірки правильності функціонування імплементації методу, описаного в розділі 2 та реалізованої на апаратній базі, описаній у підрозділі 5.1, було поставлено серію тестів. Кожен з тестів виконувався шляхом цілеспрямованого контрольованого встановлення неправильних значень на схемі задля симуляції певних проблем з електронним обладнанням або схемою керування транзистором. Задля зниження рівня випадковості тестів кожен з них виконувався багато разів протягом тривалого часу (одна година і більше), потім зібрані значення аналізувалися і робилися висновки стосовно правильності спрацювання алгоритму. Тести виконувалися на моделі у просторі станів (про яку більш детально сказано в підрозділі 5.3) оскільки вона демонструє кращий баланс точність-швидкість, ніж модель, побудована на основі PySpice.

Аналіз даних полягає в вирахуванні найбільшого та найменшого відхилення кожного з чотирьох показників (середня напруга, пульсації напруги, середній струм, пульсації струму) відносно результатів, отриманих з оптимізованого (процес оптимізації описаний в розділі 3) цифрового двійника. Далі ці найбільші та найменші відхилення порівнюються з пороговими значеннями, зазначеними в таблиці

відповідності (описаної в розділі 2 та додатку Б) і робиться висновок про напрямок відносної зміни: «-», «0» або «+», з усіх чотирьох показників формується вектор $\bar{R}$. Отриманий таким чином вектор $\bar{R}$ шукається в таблиці відповідності і перевіряється, чи містить відповідний вектор $\bar{E}$ правильну причину такої поведінки схеми. Значення відсотків кількості виявлення конкретних відхилень в таблицях округлено до десятих задля спрощення сприйняття.

Сигнали струму, отримані з реального обладнання, перед аналізом були відфільтровані за допомогою фільтру середнього ковзаючого (аналогічний підхід було використано в розділі 3.2) з вікном в 17 відліків. Дана фільтрація покращує точність роботи алгоритму в умовах зашумленості сигналів струму, як було описано в розділі 3.2. Опис сценаріїв для тестів, а також їх результати, наведено в додатку В, який демонструє, що отриманими показниками точності для заданих сценаріїв тестування є:

- Визначення наявності несправності у 100% випадків;
- Коректне визначення конкретної причини несправності у 99.5-100% випадків;
- Хибні позитивні спрацювання у 0.2%.

Слід зазначити, що наведені в додатку В показники точності та відсотки хибних спрацювань характеризують одиничний акт діагностування (результат обробки одного вимірювання). Оскільки обчислювальна вартість одного циклу діагностування є незначною порівняно із затримкою обміну даними з вимірювальним приладом (про що сказано в підрозділі 5.3), система дозволяє без істотних втрат швидкодії виконувати не одне, а серію з N незалежних вимірювань і приймати рішення про наявність відмови за мажоритарним правилом: відмова вважається виявленою лише тоді, коли її діагностує більшість вимірювань серії. За умови, що хибні спрацювання спричинені переважно випадковими шумами вимірювального тракту, а отже статистично незалежні між вимірюваннями, таке агрегування знижує ефективний відсоток хибних спрацювань на порядки порівняно з одиничним вимірюванням, оскільки ймовірність одночасної помилки більшості з N незалежних вимірювань є

істотно меншою за ймовірність помилки одного. Водночас це рішення не усуває систематичних похибок. Зокрема, коли параметр реального пристрою стабільно перебуває поблизу межі зони нечутливості, а надмірне збільшення N знижує чутливість до слабких зароджуваних відмов. Тому кількість вимірювань у серії обирається як компроміс між достовірністю та чутливістю.

5.3 Аналіз та тестування швидкодії

Методи, запропоновані в даній роботі, є абстрагованими від технологій моделювання, тобто вони не вимагають використання конкретної мови, бібліотеки, підходу тощо. В той самий час, вибір конкретної технології впливає на точність та на швидкість діагностування відмов. Тому було проведено експеримент, в якому було порівняно модель, яка була побудована з використанням технології PySpice, зі створеною власноруч моделлю у просторі станів. Експеримент виконувався на тих самих даних, на яких виконувалося тестування в підрозділі 5.2. Результати наведені в таблицях 5.2 та 5.3. Важливо зазначити, що саме модель на основі PySpice використовувалась в роботі під час оптимізації цифрового двійника (ідентифікації параметрів) та побудови таблички відповідності.

Таблиця 5.2

Порівняння точності PySpice моделі та моделі у просторі станів

Тип моделі	Розмір набору даних	Кількість правильних визначень	Відсоток правильних визначень	Кількість правильних визначень тільки в цій моделі
PySpice	171096	170930	99.90%	96
Модель у просторі станів (SS – state-space)	171096	170834	99.85%	0

З таблиці 5.2 видно, що точність моделі у просторі станів є співставною з точністю PySpice моделі. Більш того, в даних тестах використовувалися паразитні

параметри, які визначалися під час оптимізації PySpice моделі, процес чого було описано в підрозділі 3.2. Це залишає простір для покращення точності space state моделі шляхом її оптимізації.

Таблиця 5.3

Порівняння швидкодії PySpice моделі та моделі у просторі станів

Тестовий випадок	Режим	Час виконання PySpice, мс	Час виконання SS Python, мс	Покращення часу SS Python	Час виконання SS C, мкс	Покращення часу SS C
Номінальний режим (Vin=12, D=50%, R=4.1)	CCM	178	3.7	x48	18	x9888
Знижений Vin (Vin=6)	CCM	179	3.7	x48	18	x9944
Збільшений D (D=60%)	CCM	180	3.7	x49	18	x10000
Збільшений опір (R=15)	DCM	189	14.8	x13	54	x3500
Знижений D (D=5%)	DCM	192	15	x13	58	x3310

В таблиці 5.3 зображено порівняння швидкості обох моделей. Проаналізовано п'ять тестових випадків, останні два з яких працюють в режимі Discontinuous Conduction Mode (DCM, режим переривчастих струмів) – режимі, у якому струм котушки індуктивності встигає впасти до нуля протягом частини періоду комутації, що додає третій інтервал в періоді, а отже і підвищує складність моделювання. Було порівняно PySpice модель, модель у просторі станів, реалізовану мовою Python та модель у просторі станів, реалізовану мовою C. Як можна бачити з результатів, модель у просторі станів мовою Python є швидшою за PySpice в 13-49 разів, а мовою C – в 3310-10000 разів (час моделювання 18-58мкс), що є суттєвим підвищенням швидкості, важливим для застосувань, які вимагають високої швидкодії.

Загальна тривалість у часі процесу діагностування виражається наступною формулою:

$$T_{diagnostic} = T_{measure} + T_{model} + T_{search}, \quad (5.1)$$

де $T_{measure}$ це час вимірювання сигналу; T_{model} це час виконання моделювання; T_{search} це час пошуку в таблиці відповідності.

Таким чином, час виконання процесу діагностування у випадку номінального режиму роботи пристрою рахується з наступних доданків:

- $T_{measure}$ – тривалістю періоду при 300 кГц сигналі комутації є ~ 3.33 мкс. У випадку використання зовнішнього цифрового осцилографа (такого як Analog Discovery 2, який був використаний для даних експериментів) затримкою в передачі сигналів по USB є ~ 1 мс (було виміряно експериментальним шляхом, враховуючи час на переведення напруги з датчику струму у значення струму, а також розрахунку середніх значень та пульсацій).
- T_{model} – при використанні моделі у просторі станів, реалізованою мовою C, становить 18 мкс. Результатом виконання моделі у просторі станів є сигнали, а для запропонованого методу діагностики потрібними є скалярні значення середніх та пульсацій, розрахунок яких займає ~ 3 мкс, отже сумарний час на моделювання становить ~ 21 мкс. При використанні кешування значень у робочій точці, це значення стає значно нижчим (< 1 мкс);
- T_{search} – оскільки таблиця відповідності являє собою структуру даних типу hashtable з розміром в десятки елементів, то пошук по ній триває наносекунди (отже, < 1 мкс).

Як можна бачити, в даній системі швидкість діагностування обмежується здебільшого затримкою в передачі сигналу від цифрового осцилографа до пристрою, який виконує алгоритм діагностування. Було експериментально виміряно загальний час виконання процесу діагностування, який становив від 1.1 до 1.5 мс з медіаною 1.18 мс, що може бути значно покращено, якщо позбавитися від передачі сигналу через USB.

Можливим шляхом розвитку швидкодії є виконання моделювання на FPGA або оптимізації моделі шляхом визначення найменш критичних для точності паразитних параметрів та відмови від них.

5.4 Оцінювання ефективності онлайн-діагностування за показником готовності перетворювача

Метою даного дисертаційного дослідження є підвищення ефективності онлайн-виявлення та ідентифікації відмов напівпровідникових перетворювачів електроенергії. У підрозділах 5.2-5.3 експериментально підтверджено показники ефективності розроблених методів: повнота виявлення 100%, точність ідентифікації причини 99.5-100%, хибні спрацювання 0.2%, час циклу до 1.5 мс. Завданням даного підрозділу є кількісна оцінка досягнутого підвищення ефективності за інтегральним експлуатаційним показником – коефіцієнтом готовності перетворювача – відносно системи без онлайн-діагностування.

5.4.1 Критерій виконання мети та обґрунтування методу оцінювання

Відповідно до класичного визначення, стаціонарний коефіцієнт готовності визначається співвідношенням:

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}, \quad (5.2)$$

де $MTBF$ – середнє напрацювання між відмовами; $MTTR$ – середній час відновлення.

Розроблені в даній роботі методи онлайн-діагностування впливають на обидві складові виразу (5.2):

- 1) **Зниження $MTTR$:** діагностична система на основі цифрового двійника автоматично локалізує несправність до окремого компонента, що виключає з процесу відновлення найтривалішу фазу – ручний пошук причини відмови. За опублікованими даними, локалізація та діагностування несправності є найбільш тривалою складовою відновлення [142];
- 2) **Підвищення системного $MTBF$ щодо незапланованих відмов:** виявлення м'яких (параметричних) несправностей у латентній фазі (коли параметри компонента вже суттєво відхилилися від номінальних, але пристрій ще виконує основну функцію) дозволяє виконати планову заміну компонента до переростання латентної несправності у відмову на рівні системи і тим самим

запобігти як незапланованому простою, так і катастрофічним вторинним пошкодженням, механізми яких проаналізовано в розділі 1. Слід підкреслити два моменти. По-перше, для цього не потрібна прогностика (плавне відстеження трендів деградації), а достатньо факту, що виявлюваний діагностичною системою стан передуватиме функціональній відмові, саме така здатність (виявлення помітних відхилень параметрів при працездатному пристрої) експериментально підтверджена в п. 5.2. По-друге, інтенсивності відмов окремих компонентів при цьому не змінюються, а змінюється структура потоку відмов системи, оскільки тривалі незаплановані простої заміщуються короткими плановими втручаннями.

Безпосереднє застосування виразу (5.2) для кількісної оцінки є недостатнім, оскільки він не розрізняє: (а) стани прихованої деградації, в яких пристрій продовжує виконувати функцію; (б) планові та незаплановані простої, які мають суттєво різну тривалість; (в) неповноту діагностичного покриття. Адекватним математичним апаратом для систем із такою структурою станів є марковські моделі готовності, які дозволяють обчислити стаціонарний коефіцієнт готовності як суму ймовірностей перебування системи у працездатних станах.

5.4.2 Марковська модель готовності перетворювача

Функціонування перетворювача описано однорідним марковським процесом з неперервним часом із п'ятьма станами (таблиця 5.4 та рис. 5.8). Працездатними є стани S_0 та S_1 .

Таблиця 5.4

Простір станів моделі готовності

Стан	Зміст	Працездатність
S_0	Справа робота	Працездатний
S_1	Латентна несправність	Працездатний
S_2	Функціональна відмова (незапланований простій)	Непрацездатний
S_3	Катастрофічна відмова з вторинними пошкодженнями суміжних компонентів	Непрацездатний

S_4	Планова заміна деградованого компонента за сигналом діагностичної системи	Непрацездатний
-------	---	----------------

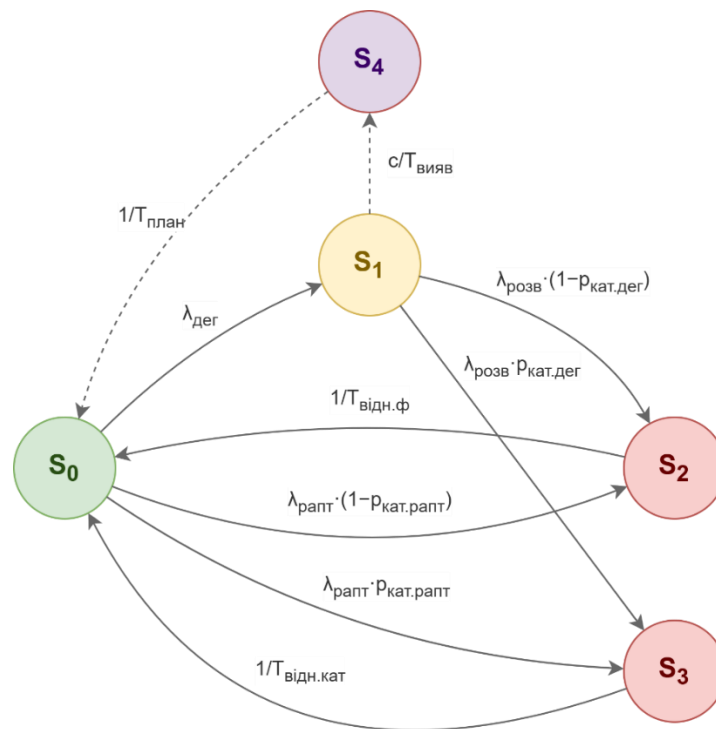


Рис. 5.8. Граф станів марковської моделі готовності перетворювача

Зі справного стану перетворювач переходить у стан латентної несправності S_1 з інтенсивністю $\lambda_{\text{дег}}$ (деградаційні механізми) або безпосередньо у стан відмови з інтенсивністю $\lambda_{\text{рапт}}$ (раптові відмови), з яких частка $p_{\text{кат.рапт}}$ є катастрофічною. Без втручання латентна несправність переростає у відмову з інтенсивністю $\lambda_{\text{розв}}$, яка обернена до Р-Г інтервалу, причому частка $p_{\text{кат.дег}}$ таких відмов є катастрофічною. Результатом впровадження системи діагностування є перехід $S_1 \rightarrow S_4$ з інтенсивністю $c/T_{\text{вияв}}$: діагностична система з покриттям c виявляє латентну несправність у середньому за час $T_{\text{вияв}}$, що дозволяє виконати планову заміну тривалістю $T_{\text{план}}$ до настання відмови. Базова система (реактивне обслуговування) описується тією самою моделлю без переходу $S_1 \rightarrow S_4$ і з більшим часом відновлення $T_{\text{відн.ф}}$, оскільки причина відмови локалізується вручну. Модель враховує також неідеальність локалізації: у частці $(1 - c)$ випадків виконується відкат до ручного пошуку, а у частці $p_{\text{неодн}}$ випадків таблиця відповідності повертає 2-3 компоненти-кандидати, які

потребують додаткового звуження за час $T_{\text{звуж.}}$.

Розв'язок моделі (включаючи вхідні параметри), наведений в додатку Г, демонструє, що введення запропонованих методів надає підвищення коефіцієнту готовності ($A_{\text{діаг}}$ для системи з діагностуванням та $A_{\text{баз}}$ для базової системи – без діагностування) перетворювача з 0.997583 до 0.999426 (зниження неготовності в 4.2 раза). Це свідчить про виконання мети, оскільки ефективність онлайн-виявлення та ідентифікації відмов оцінюється інтегрально за впливом на коефіцієнт готовності перетворювача відносно системи без онлайн-діагностування. Крім того, було проведено аналіз чутливості (додаток Д), який підтвердив стійкість висновку про підвищення готовності $A_{\text{діаг}} > A_{\text{баз}}$, включно зі стрес-тестом.

Встановлено, що основними механізмами впливу впровадження запропонованих методів на готовність є зростання системного MTBF щодо незапланованих відмов за рахунок виявлення латентних несправностей і їх усунення шляхом планової заміни до переходу системи у стан відмови, а також зниження ефективного часу відновлення за рахунок автоматичної локалізації несправного компонента (що виключає з процесу відновлення тривалу фазу ручного пошуку причини).

5.5 Висновки до розділу 5

У даному розділі виконано експериментальне підтвердження сукупності розроблених у попередніх розділах дисертації методів та технологій шляхом побудови програмно-апаратного комплексу дистанційної лабораторії силової електроніки та тестування методу діагностики на реальному обладнанні.

Основні результати розділу:

1. Розроблено метод порівняння інформаційних технологій бекенду для взаємодії з віддаленою лабораторією на базі LabDiscoveryEngine, на основі якого було обрано Node.js в якості програмної платформи для реалізації дистанційної лабораторії.
2. Розроблено програмно-апаратний комплекс дистанційної лабораторії силової електроніки на базі технології LabDiscoveryEngine (обраної за

результатами порівняльного аналізу, наведеного в розділі 4), що включає понижуючий та підвищуючий перетворювачі постійного струму з дистанційним керуванням параметрами та збором даних у реальному часі. Запропоновано та реалізовано багат шарову архітектуру Лабораторного сервера з використанням Node.js, а також розроблено два користувацькі протоколи прикладного рівня (DTO через WebSocket для клієнта та ключ-значення через UART для мікроконтролера), які завдяки розподілу відповідальності забезпечують можливість повторного використання серверного програмного забезпечення для інших типів електронного обладнання.

3. Виконано експериментальне тестування методу діагностування на реальному понижуючому перетворювачі постійного струму для 17 сценаріїв контрольованих відхилень п'яти параметрів (коефіцієнта заповнення ШІМ, вхідної напруги, опору навантаження, ємності конденсатора та індуктивності котушки). Метод забезпечив 100% виявлення факту відмови в усіх сценаріях і коректність визначення причини несправності від 99.5% до 100%, а для складніших випадків причину вдається встановити за допомогою розширеного пошуку в таблиці відповідності. Тест без відхилень на 20744 вимірюваннях показав рівень хибних спрацювань 0.2%, що підтверджує надійність порогу θ , сформованого на основі відкаліброваного генетичним алгоритмом цифрового двійника.
4. Проведено аналіз швидкодії процесу діагностування. Показано, що запропоновані методи є незалежними від технології моделювання: власноруч реалізована модель у просторі станів забезпечила співставну точність визначення конкретної причини (99.85% проти 99.90% для PySpice в умовах калібрування моделі під PySpice, а не моделі у просторі станів) при пришвидшенні обчислення еталонного сигналу у 13-49 разів (реалізація мовою Python) та у 3310-10000 разів (реалізація мовою C, 18-58 мкс). Декомпозиція загального часу діагностування засвідчила, що онлайн-фаза методу (обчислення моделі та пошук у таблиці відповідності) виконується за

десятки мікросекунд, а сумарний час виконання повного циклу діагностування (1.1-1.5 мс) визначається переважно каналом передачі сигналу вимірювального приладу (USB), а не самим методом діагностики.

5. Встановлено, що основними джерелами зниження точності визначення причини є: шуми вимірювань пульсацій при низьких рівнях сигналів, неточності в схемі вимірювання струму та обмежена кількість ступенів відносних змін у таблиці відповідності. Натомість, встановлено, що наявність динамічних завад та аномальних викидів у каналах вимірювання струму лабораторного стенду не призвела на практиці до суттєвого зниження точності діагностування, що підтверджує ефективність розробленого методу діагностики на основі цифрових двійників навіть за умов використання неідеального електронного обладнання.
6. Побудовано марковську модель готовності перетворювача (5 станів, неперервний час), яка пов'язує експериментально підтверджені характеристики розроблених методів діагностування з коефіцієнтом готовності. Розв'язок моделі показав, що впровадження онлайн-діагностування на основі цифрового двійника знижує неготовність перетворювача у 4.2 рази (K_g зростає з 0.9976 до 0.9994, середній річний простій скорочується з 21.2 до 5 год) за рахунок одночасного зниження ефективного MTTR у 1.5 рази (автоматична локалізація причини) та підвищення системного MTBF щодо незапланованих відмов у 5.1 рази (запобігання переростанню латентних несправностей у відмови), при зниженні частоти катастрофічних відмов у 6.3 рази. Аналіз чутливості підтвердив стійкість висновку $A_{diag} > A_{баз}$ в усьому дослідженому діапазоні вхідних параметрів, включно зі стрес-сценарієм із одночасно найгіршими значеннями. Таким чином, кількісно доведено, що мету дисертаційного дослідження досягнуто.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що розроблений програмно-апаратний комплекс дистанційної лабораторії з інтегрованим цифровим двійником демонструє можливість переходу від реактивного до проактивного

технічного обслуговування обладнання силової електроніки. Запропонована архітектура бекенду та комунікаційні протоколи мають універсальний характер і можуть бути адаптовані для інших дистанційних лабораторій з різним електронним обладнанням. Результати тестування підтверджують, що метод онлайн-діагностування на основі цифрового двійника, розроблений в розділах 2-3, є практично придатним для роботи з реальним обладнанням в умовах неідеальних вимірювань та паразитних ефектів, а також низька складність онлайн-фази робить метод придатним для вбудованих систем.

Основні результати розділу опубліковано в працях [146, 147, 151, 153, 156]

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано важливе науково-прикладне завдання підвищення ефективності онлайн-виявлення та ідентифікації відмов напівпровідникових перетворювачів електроенергії шляхом розроблення методів та інформаційної технології діагностування на основі цифрових двійників. Запропонований комплекс рішень охоплює повний цикл діагностики: від побудови точної математичної моделі пристрою до автоматизованого ухвалення рішення про причину несправності та експериментальної верифікації на реальному обладнанні. Ключовою рисою запропонованого рішення є інтеграція метаевристичної ідентифікації параметрів з апаратом векторної діагностики в єдину технологію, де калібрування цифрового двійника та локалізація несправності утворюють нерозривний обчислювальний ланцюг, а не послідовність незалежних методів. Основні наукові та практичні результати дисертації полягають у наступному:

1. Проведено систематичний аналіз традиційних та сучасних підходів до діагностики електронного обладнання (функціональне тестування, BIST, JTAG, ICT, методи на основі CNN, LSTM, PINN), методів побудови цифрових двійників електронних систем та технологій дистанційних лабораторій. Це дозволило обґрунтувати напрямки дослідження та сформулювати мету і завдання дисертаційної роботи.
2. Вперше розроблено інтегрований метод онлайн-діагностування напівпровідникових перетворювачів електроенергії на основі цифрового двійника, що базується на векторному представленні вхідних і вихідних параметрів електронного пристрою та нормалізованому порівнянні з еталонними значеннями цифрового двійника, відкаліброваного під конкретний екземпляр пристрою. Метод включає механізм «сірої зони» з індивідуальними пороговими значеннями для кожного компонента вихідного вектору, що забезпечує стійкість до шумів вимірювань, а також діагностичний алгоритм на основі таблиці відповідності з розширеним форматом множинних ступенів впливу. Систематизовано чотири методи

генерації таблиць відповідності та запропоновано гібридний підхід для їх комбінування. Метод реалізований програмно для понижуючого перетворювача постійного струму з таблицею відповідності, що містить 19 рядків і покриває 9 вхідних параметрів.

3. Отримали подальший розвиток методи калібрування цифрових двійників перетворювачів постійного струму на основі генетичних алгоритмів: запропоновано визначати еталонний сигнал для калібрування за критерієм рівновіддаленості його показників від граничних значень експериментальної вибірки (концепція «midpoint»). На основі порівняльного аналізу чотирьох класів методів оптимізації (градієнтні методи, метод оптимізації рою частинок, алгоритм сірого вовка та генетичний алгоритм) обґрунтовано вибір генетичного алгоритму та впроваджено логарифмічне кодування генів, що забезпечує рівномірне дослідження параметричного простору для параметрів, діапазони яких охоплюють до 9 порядків величини. Апробація на понижуючому перетворювачі з ідентифікацією семи паразитних параметрів за 6705 експериментальними вимірюваннями дала практично симетричні відхилення відкаліброваної моделі (від -41.66% до +41.69% для пульсацій напруги та від -41.64% до +42.25% для пульсацій струму), які безпосередньо використано як початкові пороги діагностування θ у розділі 2, чим забезпечено узгодження цифрового двійника з конкретним екземпляром фізичного об'єкта.
4. Отримали подальший розвиток технологічні підходи до формування архітектури дистанційних інженерних лабораторій: розроблено метод багатокритеріального порівняльного аналізу інформаційних технологій їх побудови, що базується на системі шести зважених критеріїв: рівень технологій, оновлення та підтримка, можливість інтеграції з LMS, простота архітектури, швидкодія в режимі реального часу та простота конфігурації. На основі методу проведено систематичне порівняння шести технологій дистанційних лабораторій (WebLabDeusto, LabDiscoveryEngine, VISIR Open Lab Platform 5.0, iLab Shared Architecture, FREE та edrys-Lite) за єдиною

кількісною шкалою. За результатами порівняння технологію LabDiscoveryEngine визначено як найбільш придатну для побудови нових дистанційних лабораторій електронного спрямування, що обґрунтувало її вибір як технологічної платформи для верифікації діагностичної системи.

5. У межах того самого підходу розроблено метод порівняння інформаційних технологій бекенду для взаємодії з віддаленою лабораторією на базі LabDiscoveryEngine, який враховує можливості неблокуючого введення-виведення, ресурсоефективність та розповсюдженість, що дозволило кількісно обґрунтувати вибір програмної архітектури дистанційної лабораторії взаємодії з напівпровідниковими перетворювачами електроенергії постійного струму, в якості якої обрано технологію Node.js.
6. Розроблено програмно-апаратний комплекс дистанційної лабораторії силової електроніки на базі технології LabDiscoveryEngine для перетворювачів постійного струму з інтегрованим цифровим двійником, побудованим з використанням PySpice та Ngspice. Реалізовано багат шарову архітектуру лабораторного сервера на основі Node.js та два користувацьких протоколи прикладного рівня для комунікації з клієнтом (WebSocket) та мікроконтролером (UART). Комплексне тестування на реальному понижуючому перетворювачі з 17 сценаріями контрольованих відхилень параметрів (загалом понад 46000 вимірювань) підтвердило 100% виявлення факту відмови у всіх сценаріях та коректне визначення причини несправності у 99.5-100% випадків залежно від ступеня відхилення параметрів. Тест без відхилень на 20744 вимірюваннях засвідчив низький рівень хибних спрацювань (0.2% false positive), що підтверджує надійність порогових значень та коректність калібрування цифрового двійника. Аналіз швидкодії підтвердив, що онлайн-фаза діагностики зберігає обчислювальну простоту, достатню для реалізації у вбудованих системах: обчислення еталонного сигналу та пошук причини несправності виконуються за одиниці мікросекунд (моделювання триває 18-58 мкс для моделі у просторі станів мовою C), а сумарний час діагностування (1.1-1.5 мс) обмежується

затримкою каналу передачі даних вимірювального приладу, а не методом. Незначна обчислювальна вартість одного циклу діагностування дозволяє за потреби додатково підвищувати точність шляхом агрегування серії незалежних вимірювань, знижуючи ефективний відсоток хибних спрацювань без відчутних втрат швидкості.

7. На основі марковської моделі готовності кількісно доведено досягнення мети дослідження: підвищення ефективності онлайн-виявлення та ідентифікації відмов, підтверджене експериментально, забезпечує зниження неготовності напівпровідникового перетворювача у 4.2 рази (коефіцієнт готовності зростає з 0.9976 до 0.9994, а річний простій знижується з 21.2 до 5 год) порівняно із системою без онлайн-діагностування. Ефект досягається одночасним зниженням часу відновлення (за рахунок автоматичної локалізації несправного компонента) та запобіганням переростанню латентних несправностей у незаплановані відмови. Стійкість висновку підтверджено аналізом чутливості до варіації вхідних параметрів у межах порядку величини.

Отримані результати мають практичне значення для побудови систем автоматизованої діагностики та проактивного (а в перспективі – предиктивного) технічного обслуговування силових електронних перетворювачів, а також як базова архітектура для створення дистанційних лабораторій електронних пристроїв. Запропонований метод діагностики забезпечує перехід від реактивного до проактивного технічного обслуговування і може бути адаптований для різних топологій силових перетворювачів та інших електронних пристроїв, поведінку яких можна описати моделлю залежностей вхід-вихід.

Перспективи подальших досліджень. Розроблений метод визначає не лише факт несправності, а й ступінь параметричної деградації окремих компонентів перетворювача (за рахунок розширеного формату вектора причин із множинними ступенями впливу) та локалізує її джерело за зовнішніми сигналами. Отже, вихід методу є, по суті, кількісним індикатором технічного стану компонента, а не бінарною ознакою «справний/несправний». У межах цієї роботи такий індикатор

застосовувався в рамках одиничного акту діагностування, а задача визначення передвідмовних станів окремо не досліджувалася. Однак, відстеження динаміки цього індикатора в часі відкриває можливість переходу від виявлення вже наявної деградації до прогнозування відмов: накопичення послідовності діагностичних оцінок дозволяє будувати траєкторію деградації компонента, оцінювати його залишковий ресурс і завчасно виявляти передвідмовні стани. Реалізація цієї функціональності потребує доповнення методу шаром аналізу трендів діагностичних оцінок у часі, побудови моделі зв'язку між ступенем деградації та залишковим ресурсом (на основі фізики відмов або даних випробувань до відмови) та експериментальної верифікації методами прискореного старіння компонентів. Розвиток у цьому напрямі забезпечить повноцінне предиктивне технічне обслуговування з прогнозуванням часу до відмови, доповнюючи запропоновану в роботі діагностику поточного стану.

Окремим напрямом подальших досліджень є розвиток самого діагностичного словника: розширення таблиці відповідності на ширший перелік компонентів, топологій перетворювачів і режимів роботи, а також кількісне оцінювання його повноти (тобто частки покритих відхилень відносно повного простору можливих несправностей). Формалізація такої метрики повноти дозволить об'єктивно оцінювати діагностичну спроможність створеної таблиці та цілеспрямовано доповнювати її найменш покритими сценаріями. Таким чином, розширення словника несправностей таблиці та кількісне оцінювання його повноти є напрямом подальших досліджень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Biggio, L., Kastanis, I. (2020). Prognostics and Health Management of Industrial Assets: Current Progress and Road Ahead. *Frontiers in Artificial Intelligence*, 3, Article 578613. <https://doi.org/10.3389/frai.2020.578613>
2. S. Lee, F. Chen, T. M. Jahns and B. Sarlioglu, «Review on Switching Device Fault, Protection, and Fault-Tolerant Topologies of Current Source Inverter,» *2021 IEEE 13th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)*, Dallas, TX, USA, 2021, pp. 489-495, doi: 10.1109/SDEMPED51010.2021.9605513.
3. F. Bento and A. J. Marques Cardoso, «A comprehensive survey on fault diagnosis and fault tolerance of DC-DC converters,» in *Chinese Journal of Electrical Engineering*, vol. 4, no. 3, pp. 1-12, September 2018, doi: 10.23919/CJEE.2018.8471284
4. Youssof Fassi, Vincent Heiries, Jérôme Boutet, Sebastien Boisseau. Towards physics-informed machine learning-based predictive maintenance for power converters – A review. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2023, 39 (2), pp.2692 - 2720. doi: 10.1109/TPEL.2023.3328438
5. S. S. Khan and H. Wen, «A Comprehensive Review of Fault Diagnosis and Tolerant Control in DC-DC Converters for DC Microgrids,» in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 80100-80127, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3083721
6. Gandhi, T. (Ed.). (2019). *Microelectronics Failure Analysis*. ASM International. <https://doi.org/10.31399/asm.mfadr7.9781627082471>
7. Li J, Zhang Z, Li B. Sensor Fault Detection and System Reconfiguration for DC-DC Boost Converter. *Sensors (Basel)*. 2018 Apr 28;18(5):1375. doi: 10.3390/s18051375. PMID: 29710798; PMCID: PMC5981408.
8. Schmidt S, Oberrath J, Mercorelli P. A Sensor Fault Detection Scheme as a Functional Safety Feature for DC-DC Converters. *Sensors (Basel)*. 2021 Sep 29;21(19):6516. doi: 10.3390/s21196516. PMID: 34640839; PMCID: PMC8513004.

9. Leite, D., Andrade, E., Rativa, D., & Maciel, A. M. A. (2025). Fault Detection and Diagnosis in Industry 4.0: A Review on Challenges and Opportunities. *Sensors*, 25(1), 60. <https://doi.org/10.3390/s25010060>
10. Kumar, G Kiran & Devaraj, Elangovan. (2020). A Review on Fault-diagnosis and Fault-tolerance for DC-DC Converters. *IET Power Electronics*. 13. 10.1049/iet-pel.2019.0672.
11. Ajra Y., Hoblos G., Al Sheikh H., Moubayed N. A Literature Review of Fault Detection and Diagnostic Methods in Three-Phase Voltage-Source Inverters. *Machines*. 2024; 12(9):631.
12. Hantos, G., Flynn, D., & Desmulliez, M. P. Y. (2021). Built-In Self-Test (BIST) Methods for MEMS: A Review. *Micromachines*, 12(1), 40. <https://doi.org/10.3390/mi12010040>
13. Keysight Technologies. How In-Circuit Tests Ensure PCBA Quality and Reliability [Электронный ресурс]. — 2024. — Режим доступа: <https://www.keysight.com/blogs/en/tech/educ/2024/in-circuit-test>
14. SPEA. In-Circuit testing: detecting electronic board defects [Электронный ресурс]. — 2025. — Режим доступа: <https://www.spea.com/en/news/in-circuit-testing-detecting-electronic-board-defects/>
15. Ahmed S.E., Huang X., Shah D. Advances in fault detection techniques for automated manufacturing systems in Industry 4.0. *Frontiers in Mechanical Engineering*. 2025; 10:1564846.
16. Zonta T., da Costa C.A., Righi R.R., Lima M.J., Trindade E.S., Li G.P. Predictive maintenance in the Industry 4.0: A systematic literature review. *Computers & Industrial Engineering*. 2020; 150:106889.
17. Recent advances in model-based fault diagnosis for lithium-ion batteries: A comprehensive review / *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Elsevier). — 2024. — Vol. 207. — 125686. DOI: 10.1016/j.rser.2024.125686

18. Observer-Based Robust Switch Open-Circuit Fault Diagnosis of DC-DC Converter for Fuel Cell / IEEE Trans. Power Electronics. — 2020. — Vol. 35, No. 11. — P. 11837-11847.
19. Zhao Y., Li T., Zhang X., Zhang C. Deep Learning Techniques in Intelligent Fault Diagnosis and Prognosis for Industrial Systems: A Review. *Sensors*. 2023; 23(4):1763.
20. Fernandes M, Corchado JM, Marreiros G. Machine learning techniques applied to mechanical fault diagnosis and fault prognosis in the context of real industrial manufacturing use-cases: a systematic literature review. *Appl Intell (Dordr)*. 2022;52(12):14246-14280. doi: 10.1007/s10489-022-03344-3. Epub 2022 Mar 4. PMID: 35261480; PMCID: PMC8894092.
21. Ting Huang, Qiang Zhang, Xiaoan Tang, Shuangyao Zhao, and Xiaonong Lu. 2022. A novel fault diagnosis method based on CNN and LSTM and its application in fault diagnosis for complex systems. *Artif. Intell. Rev.* 55, 2 (Feb 2022), 1289–1315. <https://doi.org/10.1007/s10462-021-09993-z>
22. Mikołajewska, E., Mikołajewski, D., Mikołajczyk, T., & Paczkowski, T. (2025). Generative AI in AI-Based Digital Twins for Fault Diagnosis for Predictive Maintenance in Industry 4.0/5.0. *Applied Sciences*, 15(6), 3166. <https://doi.org/10.3390/app15063166>
23. Brusa, E., Cibrario, L., Delprete, C., & Di Maggio, L. G. (2023). Explainable AI for Machine Fault Diagnosis: Understanding Features' Contribution in Machine Learning Models for Industrial Condition Monitoring. *Applied Sciences*, 13(4), 2038. <https://doi.org/10.3390/app13042038>
24. Kou, L., Liu, C., Cai, G.-W., & Zhang, Z. (2020). Fault Diagnosis for Power Electronics Converters based on Deep Feedforward Network and Wavelet Compression. *Electric Power Systems Research*, 185, 106370. doi:10.1016/j.epsr.2020.106370
25. Lu D., Wang Y., Zhang X. Remaining useful lifetime estimation for discrete power

- electronic devices using physics-informed neural network / D. Lu, Y. Wang, X. Zhang
// Scientific Reports, Nature. — 2023. — Vol. 13. — PMC10287649.
26. S. Chen, J. Zhang, S. Wang, P. Wen and S. Zhao, «Circuit Parameter Identification of Degrading DC-DC Converters Based on Physics-informed Neural Network,» 2022 *Prognostics and Health Management Conference (PHM-2022 London)*, London, United Kingdom, 2022, pp. 260-268, doi: 10.1109/PHM2022-London52454.2022.00053
 27. S. Zhao, Y. Peng, Y. Zhang and H. Wang, «Parameter Estimation of Power Electronic Converters With Physics-Informed Machine Learning,» in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 37, no. 10, pp. 11567-11578, Oct. 2022, doi: 10.1109/TPEL.2022.3176468
 28. Aviña Corral, Victor & Rangel-Magdaleno, José & Barron-Zambrano, Jose & Rosales-Nunez, Sergio. (2024). Review of fault detection techniques in power converters: Fault analysis and diagnostic methodologies. *Measurement*. 234. 114864. 10.1016/j.measurement.2024.114864.
 29. Dang, H.-L., & Kwak, S. (2020). Review of Health Monitoring Techniques for Capacitors Used in Power Electronics Converters. *Sensors*, 20(13), 3740. <https://doi.org/10.3390/s20133740>
 30. Faifer, M., Piegari, L., Rossi, M., & Toscani, S. (2021). An Average Model of DC–DC Step-Up Converter Considering Switching Losses and Parasitic Elements. *Energies*, 14(22), 7780. <https://doi.org/10.3390/en14227780>
 31. Mohammad Phd, Nur & Quamruzzaman, M. & Hossain, Mohammad Rubaiyat Tanvir & Alam, Mohammad. (2013). Parasitic Effects on the Performance of DC-DC SEPIC in Photovoltaic Maximum Power Point Tracking Applications. *Smart Grid and Renewable Energy*. 04. 113-121. 10.4236/sgre.2013.41014.
 32. Li, R., Shi, F., Cai, X., & Xu, H. (2019). Influence of Parasitic Parameters on DC–DC Converters and Their Method of Suppression in High Frequency Link 35 kV PV Systems. *Energies*, 12(19), 3743. <https://doi.org/10.3390/en12193743>

33. Yang, Shaoyong & Xiang, Dawei & Bryant, A.T. & Mawby, P. & Ran, Li & Tavner, P.J.. (2010). Condition Monitoring for Device Reliability in Power Electronic Converters: A Review. *Power Electronics, IEEE Transactions on*. 25. 2734 - 2752. 10.1109/TPEL.2010.2049377.
34. J. Poon, I. C. Konstantakopoulos, C. Spanos and S. R. Sanders, «Real-time model-based fault diagnosis for switching power converters,» 2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Charlotte, NC, USA, 2015, pp. 358-364, doi: 10.1109/APEC.2015.7104375. keywords: {Switches;Circuit faults;Fault diagnosis;Real-time systems;Uninterruptible power systems;DC-DC power converters;Steady-state},
35. Rosenthal, T.J. & Rio, J.L. & Olagbemi, O.O. & Gómez, P.. (2026). Accurate estimation of passive component defect and degradation in DC-DC power converters from transient terminal responses. *Electric Power Systems Research*. 250. 112137. 10.1016/j.epsr.2025.112137.
36. Hałgas, S. (2024). Diagnosis of Analog Circuits: The Problem of Ambiguity of Test Equation Solutions. *Electronics*, 13(4), 684. <https://doi.org/10.3390/electronics13040684>
37. J. Poon, P. Jain, I. C. Konstantakopoulos, C. Spanos, S. K. Panda and S. R. Sanders, "Model-Based Fault Detection and Identification for Switching Power Converters," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 2, pp. 1419-1430, Feb. 2017, doi: 10.1109/TPEL.2016.2541342
38. Md Towfiq uz Zaman. Predictive Maintenance of Electric Vehicle Components Using IoT Sensors. *TechRxiv*. October 06, 2025. DOI: 10.36227/techrxiv.175978928.82250472/v1
39. Gonzalez-Jimenez, D., del-Olmo, J., Poza, J., Garramiola, F., & Madina, P. (2021). Data-Driven Fault Diagnosis for Electric Drives: A Review. *Sensors*, 21(12), 4024. <https://doi.org/10.3390/s21124024>
40. Lan, Yujie & Yang, Lei & Zhang, Xu & Chen, Qingbin & Zheng, Zaiping. (2023).

Calculation Model of Parasitic Capacitance for High-Frequency Inductors and Transformers. IEEE Access. PP. 1-1. 10.1109/ACCESS.2023.3341867.

41. Zhao, Shuai & Peng, Yingzhou & Zhang, Yi & Wang, Huai. (2022). Physics-informed Machine Learning for Parameter Estimation of DC-DC Converter. 324-329. 10.1109/APEC43599.2022.9773482.
42. Houcine Chafouk, Rihab El Houda Thabet, 6 - Fault Diagnosis in a DC/DC Converter for Electric Vehicles, Editor(s): Abdelkhalak El Hami, David Delaux, Henri Grzeskowiak, Reliability of High-Power Mechatronic Systems 2, Elsevier, 2017, Pages 199-220, ISBN 9781785482618, <https://doi.org/10.1016/B978-1-78548-261-8.50006-1>.
43. S. Ou *et al.*, "A Unified Framework for System-Level Condition Monitoring of Power Electronic Converters," in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics*, doi: 10.1109/JESTIE.2026.3680943
44. Rutkowski, J.. (1993). A DC approach for analog fault dictionary determination.
45. P. Jain, J. Poon, J. P. Singh, C. Spanos, S. R. Sanders and S. K. Panda, "A Digital Twin Approach for Fault Diagnosis in Distributed Photovoltaic Systems," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 35, no. 1, pp. 940-956, Jan. 2020, doi: 10.1109/TPEL.2019.2911594
46. S. Rahman, D. Liu, M. Menner, Y. Wang and T. Takegami, "Extended Kalman Filter-Based Predictive Maintenance of High-Voltage DC/DC Converter," *IECON 2023-49th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Singapore, Singapore, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/IECON51785.2023.10312019.
47. P. Jain *et al.*, "A luenberger observer-based fault detection and identification scheme for photovoltaic DC-DC converters," *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Beijing, China, 2017, pp. 5015-5020, doi: 10.1109/IECON.2017.8216866.
48. Wuni, I. Y., Grieves, M., Yamin, M. J., & Koroma, S. A. (2025). Conceptualising the

digital twin: An analysis of 358 definitions. Digital Twin.
<https://doi.org/10.1080/27525783.2025.2600763>

49. B. Lei et al., «What is a Digital Twin Anyway? Deriving the Definition for the Built Environment from over 15,000 Scientific Publications,» *arXiv preprint*, 2024.
50. M. Grieves and J. Vickers, «Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems,» Springer, pp. 85–113, 2017.
51. Piascik, R., Vickers, J., Lowry, D., Scotti, S., Stewart, J., & Calomino, A. (2010). Technology area 12: Materials, structures, mechanical systems, and manufacturing road map. NASA Office of Chief Technologist.
52. Glaessgen, Edward & Stargel, David. (2012). The digital twin paradigm for future NASA and U.S. air force vehicles. 10.2514/6.2012-1818.
53. Tao, Fei & Zhang, He & Liu, Ang & Nee, Andrew. (2019). Digital Twin in Industry: State-of-the-Art. IEEE Transactions on Industrial Informatics. 15. 2405-2415. 10.1109/TII.2018.2873186.
54. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Foundational Research Gaps and Future Directions for Digital Twins. – Washington, DC: The National Academies Press, 2024.
55. ISO 23247-1:2021. Automation systems and integration — Digital twin framework for manufacturing — Part 1: Overview and general principles. – International Organization for Standardization.
56. ISO/IEC 30173:2023. Digital twin — Concepts and terminology. – ISO/IEC.
57. Hedayati Kia, S., Dunai, L., Antonino-Daviu, J. A., & Razik, H. (2025). Real-Time Digital Twins for Intelligent Fault Diagnosis and Condition-Based Monitoring of Electrical Machines. *Energies*, 18(17), 4637. <https://doi.org/10.3390/en18174637>
58. Milton, Matthew & de la O, Castulo & Ginn, Herbert & Benigni, Andrea. (2020). Controller-Embeddable Probabilistic Real-Time Digital Twins for Power Electronic Converter Diagnostics. IEEE Transactions on Power Electronics. PP. 1-1.

10.1109/TPEL.2020.2971775.

59. Kritzinger, Werner & Karner, Matthias & Traar, Georg & Henjes, Jan & Sihn, Wilfried. (2018). Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. IFAC-PapersOnLine. 51. 1016-1022. 10.1016/j.ifacol.2018.08.474.
60. J. M. Hunde et al., «Data-driven and physics-based modeling approaches and their integration in building digital twins: A systematic review» Journal of Building Engineering, 2025.
61. A. Rasheed, O. San and T. Kvamsdal, «Digital Twin: Values, Challenges and Enablers From a Modeling Perspective,» in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 21980-22012, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2970143.
62. S. Roy, M. Behnamfar, A. Debnath and A. Sarwat, «Data-Driven Digital Twin for Reliability Assessment of DC/DC Buck Converter,» in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 13, no. 3, pp. 2712-2724, June 2025, doi: 10.1109/JESTPE.2024.3497772.
63. Raymon van Dinter, Bedir Tekinerdogan, Cagatay Catal, Predictive maintenance using digital twins: A systematic literature review, Information and Software Technology, Volume 151, 2022, 107008, ISSN 0950-5849, <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2022.107008>.
64. Grieves, Michael. (2023). Digital Twins: Past, Present, and Future. 10.1007/978-3-031-21343-4.
65. Torchio, Riccardo & Conte, F. & Scarpa, Mattia & Filippini, M. & Pase, Francesco & Toso, Francesco & Nasab, P. & Marson, E. & Viroli, A. & Posa, P. & Zangoli, M.. (2025). Digital Twins in Power Electronics: A Comprehensive Approach to Enhance Virtual Thermal Sensing. IEEE Transactions on Power Electronics. PP. 1-11. 10.1109/TPEL.2025.3531695.
66. Kapteyn, M. G., Knezevic, D. J., Huynh, D. B. P., Tran, M., & Willcox, K. E. (2020). Data-driven physics-based digital twins via a library of component-based reduced-

- order models. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 123(13), 2986–3003. <https://doi.org/10.1002/nme.6423>
67. Wright, Louise & Davidson, Stuart. (2020). How to tell the difference between a model and a digital twin. *Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences*. 7. 10.1186/s40323-020-00147-4.
 68. H. Darvishi, D. Ciunzo and P. S. Rossi, «Real-Time Sensor Fault Detection, Isolation and Accommodation for Industrial Digital Twins,» *2021 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC)*, Xiamen, China, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICNSC52481.2021.9702175.
 69. Bofill, J., Abisado, M., Villaverde, J., & Sampedro, G. A. (2023). Exploring Digital Twin-Based Fault Monitoring: Challenges and Opportunities. *Sensors*, 23(16), 7087. <https://doi.org/10.3390/s23167087>
 70. Liu, H., Xia, M., Williams, D., Sun, J., & Yan, H. (2022). Digital Twin-Driven Machine Condition Monitoring: A Literature Review. *Journal of Sensors*, 2022, 1–13. <https://doi.org/10.1155/2022/6129995>
 71. Nguyen, Tat Nghia & Ponciroli, Roberto & Bruck, Paul & Esselman, Thomas & Rigatti, Joseph & Vilim, R.. (2022). A digital twin approach to system-level fault detection and diagnosis for improved equipment health monitoring. *Annals of Nuclear Energy*. 170. 109002. 10.1016/j.anucene.2022.109002.
 72. Yu, Jinsong & Song, Yue & Tang, Diyin & Dai, Jing. (2020). A Digital Twin approach based on nonparametric Bayesian network for complex system health monitoring. *Journal of Manufacturing Systems*. 58. 10.1016/j.jmsy.2020.07.005.
 73. Ademujimi, T., & Prabhu, V. (2022). Digital Twin for Training Bayesian Networks for Fault Diagnostics of Manufacturing Systems. *Sensors*, 22(4), 1430. <https://doi.org/10.3390/s22041430>
 74. Min Xia, Haidong Shao, Darren Williams, Siliang Lu, Lei Shu, Clarence W. de Silva, Intelligent fault diagnosis of machinery using digital twin-assisted deep transfer

learning, Reliability Engineering & System Safety, Volume 215, 2021, 107938, ISSN 0951-8320, <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107938>.

75. Y. Peng, S. Zhao and H. Wang, «A Digital Twin Based Estimation Method for Health Indicators of DC–DC Converters,» in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 36, no. 2, pp. 2105-2118, Feb. 2021, doi: 10.1109/TPEL.2020.3009600.
76. Lei, Z., Zhou, H., Dai, X. et al. Digital twin based monitoring and control for DC-DC converters. *Nat Commun* 14, 5604 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41467-023-41248-z>
77. G. De Carne *et al.*, «On Modeling Depths of Power Electronic Circuits for Real-Time Simulation – A Comparative Analysis for Power Systems,» in *IEEE Open Access Journal of Power and Energy*, vol. 9, pp. 76-87, 2022, doi: 10.1109/OAJPE.2022.3148777.
78. A. Wunderlich and E. Santi, «Digital Twin Models of Power Electronic Converters Using Dynamic Neural Networks,» 2021 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Phoenix, AZ, USA, 2021, pp. 2369-2376, doi: 10.1109/APEC42165.2021.9487201.
79. M. Delhommais, «Review of optimization methods for the design of power electronics systems,» 2020 22nd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'20 ECCE Europe), Lyon, France, 2020, pp. 1-10, doi: 10.23919/EPE20ECCEurope43536.2020.9215683.
80. G. Rojas-Dueñas, J. -R. Riba and M. Moreno-Eguilaz, «Nonlinear Least Squares Optimization for Parametric Identification of DC–DC Converters,» in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 36, no. 1, pp. 654-661, Jan. 2021, doi: 10.1109/TPEL.2020.3003075.
81. Guilherme Spavieri, Ricardo T.M. Ferreira, Ricardo A.S. Fernandes, Guilherme G. Lage, Daniel Barbosa, Mário Oleskovicz, Particle Swarm Optimization-based approach for parameterization of power capacitor models fed by harmonic voltages, *Applied Soft Computing*, Volume 56, 2017, Pages 55-64, ISSN 1568-

4946,<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2017.02.017>.

82. Radosavljevic, J. (2018). Metaheuristic Optimization in Power Engineering. Institution of Engineering and Technology. <https://doi.org/10.1049/pbpo131e>
83. K. Sundareswaran, K. V. S. M. K. Vadali, S. K. Nadeem and H. N. Shyam, «Robust Controller Identification for a Boost Type DC-DC Converter Using Genetic Algorithm,» 2008 IEEE Region 10 and the Third international Conference on Industrial and Information Systems, Kharagpur, India, 2008, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICIINFS.2008.4798348.
84. Nassereddine, K., Turzynski, M. Comparison of metaheuristic algorithms set-point tracking-based weight optimization for model predictive control. Sci Rep 15, 41414 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-25319-3>
85. Benteşen Yakut, Y. (2024). Optimization of Proportional–Integral (PI) and Fractional-Order Proportional–Integral (FOPI) Parameters Using Particle Swarm Optimization/Genetic Algorithm (PSO/GA) in a DC/DC Converter for Improving the Performance of Proton-Exchange Membrane Fuel Cells. *Energies*, 17(4), 890. <https://doi.org/10.3390/en17040890>
86. De León Aldaco, Susana & Calleja, Hugo & Aguayo, Jesus. (2015). Metaheuristic Optimization Methods Applied to Power Converters: A Review. IEEE Transactions on Power Electronics. 10.1109/TPEL.2015.2397311.
87. J. R. Ortiz-Castrillón, S. D. Saldarriaga-Zuluaga, N. Muñoz-Galeano, et al., «Optimal Sliding-Mode Control of Semi-Bridgeless Boost Converters Considering Power Factor Corrections» *Energies*, vol. 16, no. 17, p. 6282, 2023.
88. Liu, Y., As'array, A., Hassan, M.K. et al. Review of the grey wolf optimization algorithm: variants and applications. *Neural Comput & Applic* 36, 2713–2735 (2024). <https://doi.org/10.1007/s00521-023-09202-8>
89. Negi, G., Kumar, A., Pant, S. et al. GWO: a review and applications. *Int J Syst Assur Eng Manag* 12, 1–8 (2021). <https://doi.org/10.1007/s13198-020-00995-8>

90. S. A. Abdelaal, A. Hussein and H. Mostafa, «A Bayesian Optimization Framework for Analog Circuits Optimization,» *2020 15th International Conference on Computer Engineering and Systems (ICCES)*, Cairo, Egypt, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICCES51560.2020.9334576.
91. S. Chen, S. Wang, P. Wen and S. Zhao, «Digital Twin for Degradation Parameters Identification of DC-DC Converters Based on Bayesian Optimization,» *2021 IEEE International Conference on Prognostics and Health Management (ICPHM)*, Detroit (Romulus), MI, USA, 2021, pp. 1-9, doi: 10.1109/ICPHM51084.2021.9486446.
92. Raman, Raghu & Achuthan, Krishnashree & Nair, Vinith & Nedungadi, Prema. (2022). Virtual Laboratories- A historical review and bibliometric analysis of the past three decades. *Education and Information Technologies*. 27. 11055-11087. 10.1007/s10639-022-11058-9.
93. Li J, Liang W. Effectiveness of virtual laboratory in engineering education: A meta-analysis. *PLoS One*. 2024 Dec 30;19(12):e0316269. doi: 10.1371/journal.pone.0316269. PMID: 39775269; PMCID: PMC11684589.
94. Rejón, C., Martín, S., & Robles-Gómez, A. (2024). Easy Development of Industry 4.0 Remote Labs. *Electronics*, 13(8), 1508. <https://doi.org/10.3390/electronics13081508>
95. Guerrero-Osuna, H. A., García-Vázquez, F., Ibarra-Delgado, S., Mata-Romero, M. E., Nava-Pintor, J. A., Ornelas-Vargas, G., Castañeda-Miranda, R., Rodríguez-Abdalá, V. I., & Solís-Sánchez, L. O. (2024). Developing a Cloud and IoT-Integrated Remote Laboratory to Enhance Education 4.0: An Approach for FPGA-Based Motor Control. *Applied Sciences*, 14(22), 10115. <https://doi.org/10.3390/app142210115>
96. Anheló, Jesús & Robles-Gómez, Antonio & Martín, Sergio. (2023). Internet of Things Remote Laboratory for MQTT Remote Experimentation. 10.1007/978-3-031-48590-9_16.
97. Li, J., & Liang, W. (2024). Effectiveness of virtual laboratory in engineering education: A meta-analysis. *PLOS ONE*, 19(12), e0316269. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0316269>

98. Achuthan, K., Raghavan, D., Shankar, B. et al. Impact of remote experimentation, interactivity and platform effectiveness on laboratory learning outcomes. *Int J Educ Technol High Educ* 18, 38 (2021). <https://doi.org/10.1186/s41239-021-00272-z>
99. Van den beemt, Antoine & Groothuijsen, Suzanne & Ozkan, Leyla & Hendrix, Will. (2022). Remote labs in higher engineering education: engaging students with active learning pedagogy. *Journal of Computing in Higher Education*. 35. 1-21. 10.1007/s12528-022-09331-4.
100. Diego Casado-Mansilla, Javier García-Zubia, Jordi Cuadros, Vanessa Serrano, Daniela Fadda, y Veronica Canivell, Remote experiments for STEM education and engagement in rural schools: The case of project R3, *Technology in Society*, Volume 75, 2023, 102404, ISSN 0160-791X, <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2023.102404>.
101. Won-Jae Yun, Sungjin Hong, Kyu-Wha Lee, Dohyeon Kim, Hyungjung Kim, Sung-Hoon Ahn, SmartLab: Flexible and interoperable manufacturing laboratory system for remote education and research using a mobile manipulator, *Journal of Computational Design and Engineering*, Volume 12, Issue 4, April 2025, Pages 221–235, <https://doi.org/10.1093/jcde/qwaf034>
102. Löcklin, Andreas & Müller, Manuel & Jung, Tobias & Jazdi, Nasser & White, Dustin & Weyrich, Michael. (2020). Digital Twin for Verification and Validation of Industrial Automation Systems -a Survey. 10.1109/ETFA46521.2020.9212051.
103. Wuttke, Heinz-Dietrich & Henke, Karsten & Hutschenreuter, René. (2020). Digital Twins in Remote Labs. 10.1007/978-3-030-23162-0_26.
104. Xiong J., Ye H., Pei W., Kong L., Huo Q., Han Y. A monitoring and diagnostics method based on FPGA-digital twin for power electronic transformer. *Electric Power Systems Research*. 2022. Vol. 210. P. 108347. DOI: 10.1016/j.epsr.2022.108347.
105. Liu, He, Xia, Min, Williams, Darren, Sun, Jianzhong, Yan, Hongsheng, Digital Twin-Driven Machine Condition Monitoring: A Literature Review, *Journal of Sensors*, 2022, 6129995, 13 pages, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/6129995>

106. Harward, Judson & Alamo, Jesus & Lerman, Steven & Bailey, Philip & Carpenter, Joel & DeLong, Kimberley & Felknor, Chris & Hardison, James & Harrison, Bryant & Jabbour, Imad & Long, Phillip & Mao, Tingting & Naamani, Loai & Northridge, Jedidiah & Schulz, Mark & Talavera, Daniel & Varadharajan, Charuleka & Wang, Shaomin & Yehia, Karim & Zych, David. (2008). The iLab Shared Architecture: A Web Services Infrastructure to Build Communities of Internet Accessible Laboratories. *Proceedings of the IEEE*. 96. 931 - 950. 10.1109/JPROC.2008.921607.
107. Villar-Martínez, Aitor & Ortiz-de-Zarate, Lucas & Rodriguez-Gil, Luis & Hernandez, Unai & Garcia-Zubia, Javier & Angulo, Ignacio & Terkowsky, Claudius & Ortelt, Tobias & Wilkesmann, Uwe & Nowak, Robert & Frei, Stephan & Arguedas Matarrita, Carlos & Montero-Miranda, Eric & Orduña, Pablo. (2024). LabsLand Electronics Laboratory: Distributed, Scalable and Reliable Remote Laboratory for Teaching Electronics. 10.1007/978-3-031-42467-0_24.
108. Schauer, Franz & Ožvoldová, Miroslava & Gerza, Michal & Krbeček, Michal & Beno, Pavel & Komenda, Tomas & Das, Sayan & Archibong, Mbuotidem. (2017). REMLABNET IV – LTI Federated Remote Laboratory Management System with Embedded Multiparameter Simulations. *International Journal of Online Engineering (iJOE)*. 13. 103. 10.3991/ijoe.v13i10.7802.
109. Wang, Z., Liu, H., Han, L., Huang, L., & Wang, K. (2021). Research and Implementation of Scheduling Strategy in Kubernetes for Computer Science Laboratory in Universities. *Information*, 12(1), 16. <https://doi.org/10.3390/info12010016>
110. Dietrich, A., Hyadi, J., & Zug, S. (2025). Server or Cloud? Who needs it! Peer-to-Peer Remote Labs with edrys-Lite. – Modular & Reconfigurable & Reusable & Browser-Based Real-Time Experiments. *Gesellschaft Für Informatik e.V.* https://doi.org/10.18420/DELFI2025_25
111. Mahmoud, H., Abozariba, R. A systematic review on WebRTC for potential applications and challenges beyond audio video streaming. *Multimed Tools Appl* 84,

2909–2946 (2025). <https://doi.org/10.1007/s11042-024-20448-9>

112. Domínguez, M., González-Herbón, R., Rodríguez-Ossorio, J. R., Fuertes, J. J., Prada, M. A., & Morán, A. (2020). Development of a Remote Industrial Laboratory for Automatic Control based on Node-RED. IFAC-PapersOnLine, 53(2), 17210–17215. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.1741>
113. Sanchez Vilorio, Jose & Zapata-Rivera, Luis Felipe & Aranzazu Suescun, Catalina & Pena-Molina, Andrea & Larrondo Petrie, María. (2021). Online Laboratory Communication Using MQTT IoT Standard. 550-555. 10.1109/WEEF/GEDC53299.2021.9657292.
114. Alsaleh, Saleh & Tepljakov, Aleksei & Kose, Ahmet & Belikov, Juri & Petlenkov, Eduard. (2022). ReImagine Lab: Bridging the Gap Between Hands-On, Virtual and Remote Control Engineering Laboratories Using Digital Twins and Extended Reality. IEEE Access. PP. 1-1. 10.1109/ACCESS.2022.3199371.
115. Lei, Z., Zhou, H., Hu, W., & Liu, G.-P. (2023). Web-based digital twin online laboratories: Methodologies and implementation. Digital Twin, 1(4). <https://doi.org/10.12688/digitaltwin.17563.3>
116. Soll, Marcus & Haase, Jan & Helbing, Pierre & Nau, Johannes. (2022). What are we Missing for Effective Remote Laboratories?. 1-6. 10.1109/GeCon55699.2022.9942771.
117. Abekiri, Najib & Rachdy, Azeddine & Ajaamoum, Mohamed & Nassiri, Boujemaa & ELMAHNI, Lahoussine & Oubail, Youssef. (2022). Platform for hands-on remote labs based on the ESP32 and NOD-red. Scientific African. 19. e01502. 10.1016/j.sciaf.2022.e01502.
118. Valencia de Almeida, F., Hayashi, V. T., Arakaki, R., Midorikawa, E., de Mello Canovas, S., Cugnasca, P. S., & Corrêa, P. L. P. (2022). Teaching Digital Electronics during the COVID-19 Pandemic via a Remote Lab. Sensors, 22(18), 6944. <https://doi.org/10.3390/s22186944>

119. Garefalakis, M., Kamarianakis, Z., & Panagiotakis, S. (2024). Towards a Supervised Remote Laboratory Platform for Teaching Microcontroller Programming. *Information*, 15(4), 209. <https://doi.org/10.3390/info15040209>
120. Faulconer, Emily & Gruss, Amy. (2018). A Review to Weigh the Pros and Cons of Online, Remote, and Distance Science Laboratory Experiences. *The International Review of Research in Open and Distributed Learning*. 19. 10.19173/irrodl.v19i2.3386.
121. Mirjalili, Seyedali & Mirjalili, Seyed & Lewis, Andrew. (2014). Grey Wolf Optimizer. *Advances in Engineering Software*. 69. 46–61. 10.1016/j.advengsoft.2013.12.007.
122. J. Aguila-Leon et al., «Particle Swarm Optimization, Genetic Algorithm and Grey Wolf Optimizer Algorithms Performance Comparative for a DC-DC Boost Converter PID Controller» *ASTESJ*, vol. 6, no. 1, pp. 619-625, 2021.
123. P. Orduña et al., «An Extensible Architecture for the Integration of Remote and Virtual Laboratories in Public Learning Tools,» in *IEEE Revista Iberoamericana de Tecnologías del Aprendizaje*, vol. 10, no. 4, pp. 223-233, Nov. 2015, doi: 10.1109/RITA.2015
124. P. Orduña et al., «Generic integration of remote laboratories in public learning tools: Organizational and technical challenges,» *2014 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE) Proceedings*, Madrid, Spain, 2014, pp. 1-7, doi: 10.1109/FIE.2014.7044025.
125. Головна сторінка технології LabDiscoveryEngine (б.д.) Lab Discovery Engine Website. Взято 15 листопада 2024 р. з <https://labdiscoveryengine.labsland.com/>
126. Головна сторінка технології WebLabDeusto (б.д.) WebLab-Deusto - Front Page. Взято 15 листопада 2024 р. з <https://weblab.deusto.es/website/index.html>
127. Сторінка GitHub репозиторію вихідного коду технології WebLabDeusto (б.д.) GitHub – weblabdeusto/weblabdeusto. Взято 15 листопада 2024 р. з

<https://github.com/weblabdeusto/weblabdeusto>

128. Головна сторінка платформи дистанційних лабораторій LabsLand (б.д.) LabsLand - Home. Взято 15 листопада 2024 р. з <https://labsland.com>
129. Документація LabDiscoveryLib (б.д.) labdiscoverylib – 0.6 – labdiscoverylib 0.6 documentation. Взято 15 листопада 2024 р. з <https://developers.labsland.com/labdiscoverylib/en/stable>
130. V. J. Harward et al., «The iLab Shared Architecture: A Web Services Infrastructure to Build Communities of Internet Accessible Laboratories,» in *Proceedings of the IEEE*, vol. 96, no. 6, pp. 931-950, June 2008, doi: 10.1109/JPROC.2008.921607
131. K. Jeppson, P. Lundgren, J. A. del Alamo, J. L. Hardison, and D. Zych, BSharing online laboratories and their componentsVA new learning experience, in Proc. 5th Eur. Workshop Microelectron. Educ., Lausanne, Switzerland, Apr. 15–16, 2004
132. E. Sancristóbal et al., «Development and interaction between LMS services and remote labs,» *Int. J. Online Eng.*, vol. 4, no. 3, pp. 35–41, 2008.
133. E. Sancristobal Ruiz, M. Castro, J. Harward, P. Baley, K. DeLong, and J. Hardison, «Integration view of Web Labs and Learning Management Systems,» in *IEEE EDUCON 2010 Conference*, IEEE, 2010, pp. 1409–1417. doi: 10.1109/EDUCON.2010.5492363
134. Опис The iLab Shared Architecture (б.д.) Developers – iLabs Dev – MIT Wiki Service. Взято 15 листопада 2024 р. з <https://wikis.mit.edu/confluence/display/ILAB2/Developers>
135. Garcia-Zubia, J. et al. (2021). Using VISIR Remote Lab in the Classroom: Case of Study of the University of Deusto 2009–2019. In: Auer, M., May, D. (eds) *Cross Reality and Data Science in Engineering. REV 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 1231. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-52575-0_7
136. D. May, B. Reeves, M. Trudgen and A. Alweshah, «The remote laboratory VISIR -

- Introducing online laboratory equipment in electrical engineering classes,» *2020 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE)*, Uppsala, Sweden, 2020, pp. 1-9, doi: 10.1109/FIE44824.2020.9274121
137. Gustavsson, I.; Alves, G.; Costa, R.; Nilsson, K.; Zackrisson, J.; Hernandez-Jayo, U.; Garcia-Zubia, J. The VISIR Open Lab Platform 5.0—An architecture for a federation of remote laboratories. In *Proceedings of the Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV 2011) Congress*, Brasov, Romania, 29 June–2 July 2011.
 138. Опис системи VISIR (б.д.) What is VISIR? Взято 15 листопада 2024 р. з https://labsland.com/pub/docs/experiments/electronics/en/use_this_laboratory.html#what-is-visir
 139. P. Kurisčák et al., «Design and implementation of a framework for remote experiments in education,» in *8th Intl. Engineering, Sciences and Technology Conference (IESTEC)*, 2022, pp. 258–265
 140. Razwan Mohmed Salah Najimaldeen, Gustavo Ribeiro Alves, Dezheen Abdulazeez, Pedro Guerreiro, Ingvar Gustavsson, «Why VISIR? Proliferative activities and collaborative work of VISIR system,» *7th annual International Conference on Education and New Learning Technologies (EDULEARN2015)*, pp. 3824 – 3835.
 141. Riba, J.-R.; Moreno-Eguilaz, M.; Bogarra, S.; Garcia, A. Parameter Identification of DC-DC Converters under Steady-State and Transient Conditions Based on White-Box Models. *Electronics* 2018, 7, 393. <https://doi.org/10.3390/electronics7120393>
 142. Dhillon, B.S. (2006) *Maintainability, Maintenance, and Reliability for Engineers*. Taylor & Francis Group, Boca Raton. <https://doi.org/10.1201/9781420006780>
 143. Nippon Chemi-Con, "Lifetime of Aluminum Electrolytic Capacitors"
 144. "IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems (Gold Book) (Color Book® Series)," in *IEEE Std 493-2007 (Revision*

of *IEEE Std 493-1997*), vol., no., pp.1-383, 25 June 2007, doi: 10.1109/IEEESTD.2007.380668

145. Moubray, J. (1997) *Reliability Centered Maintenance*. Butterworth-Heinemann, Oxford.
146. Baida V., Velihorskyi O., Khomenko M., Velihorskyi B. Back-End Technology of the Remote Power Electronics Laboratory Based on LabDiscoveryEngine. Mathematical Modeling and Simulation of Systems. MODS 2024. Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 1391. Springer, Cham, 2025. P. 379–392. https://doi.org/10.1007/978-3-031-90735-7_29
147. Велігорський Б., Байда В., Хоменко М. Практичні аспекти створення інтерфейсу користувача віддаленої лабораторії електроніки. Технічні науки та технології. 2025. № 1 (39). С. 206–217. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-1\(39\)-206-217](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-1(39)-206-217)
148. Байда В., Велігорський О. Методика порівняння інформаційних технологій побудови дистанційних лабораторій апаратного забезпечення. Технічні науки та технології. 2024. № 4 (38). С. 172–188. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-4\(38\)-172-188](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-4(38)-172-188)
149. Байда В., Велігорський О. Методологія діагностики апаратного забезпечення з використанням інформаційної технології цифрового двійника. Технічні науки та технології. 2025. № 2 (40). С. 234–253. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2\(40\)-234-253](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-234-253)
150. Байда В., Велігорський О. Ідентифікація паразитних параметрів моделі перетворювача постійного струму генетичним алгоритмом. Технічні науки та технології. 2025. № 4 (42). С. 165–186. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4\(42\)-165-186](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4(42)-165-186)
151. Байда В., Велігорський О. Розробка та практична імплементація інформаційної технології діагностики перетворювачів постійного струму на основі фізично-орієнтованих цифрових двійників. Технічні науки та технології.

2026. № 1 (43). С. 161–182. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1\(43\)-161-182](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-161-182)

152. Байда В., Іванець С. Віддалені лабораторії по роботі з апаратними засобами вбудованих систем. Новітні технології у науковій діяльності і навчальному процесі : зб. тез Всеукр. наук.-практ. конф. студентів, аспірантів та молодих учених (м. Чернігів, 19–20 квіт. 2023 р.). Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2023. С. 247–249.
153. Байда В., Іванець С. Implementation of the server part of a remote power electronics laboratory based on the LabDiscoveryEngine system. Юність науки – 2024 : зб. тез доп. XIV Міжнар. наук.-практ. конф. студ., асп. і мол. вчен. (м. Чернігів, 24–26 квіт. 2024 р.). Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2024. С. 1046–1047.
154. Baida V., Ivanets S. Building a Virtual Hardware Laboratory with FPGA and Raspberry Pi Integration. Theoretical and Applied Aspects of Device Development on Microcontrollers and FPGAs : V Int. Sci. and Pract. Conf. MC&FPGA-2023 (Kharkiv, June 22–23, 2023). Kharkiv : NURE, 2023. P. 36–37.
155. Baida V. D., Velihorsky O. A., Kazymyr V. V. Laboratory platform for remote hardware experimentation. Новітні технології сучасного суспільства НТСС-2024 : наук.-практ. конф. Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2024. С. 185–186.
156. Velihorskyi O., Khomenko M., Baida V., Velihorskyi B., Chakirov R. DC-DC Power Converters Remote Laboratory Based on LabDiscoveryEngine. 2025 IEEE PES 35th Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), 29 Sept. – 1 Oct. 2025. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/AUPEC66173.2025.11219557>

ДОДАТКИ

Додаток А. Довідки про впровадження

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І
НАУКИ УКРАЇНИ



MINISTRY OF EDUCATION AND
SCIENCE OF UKRAINE

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ЧЕРНІГІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

тел. +38(0462) 665-103;
факс +38(0462) 665-105
E-mail: cstu@stu.cn.ua
www.stu.cn.ua
Код ЄДРПОУ 05460798

CHERNIHIV POLYTECHNIC
NATIONAL UNIVERSITY

вул. Шевченка, 95, Чернігів, 14035,
Україна

95, Shevchenko str., Chernihiv, 14035,
Ukraine

15.07.2026 № 202/08-1338

На № _____ від _____

ДОВІДКА

про впровадження результатів дисертаційного дослідження

Байди Владислава Дмитровича на тему:

«Методи та інформаційна технологія діагностування відмов у
напівпровідникових перетворювачах електроенергії на основі цифрових двійників»

Результати дисертаційної роботи Байди В.Д., використано в проєктній діяльності Національного університету «Чернігівська політехніка», зокрема:

1) По міжнародному проєкту LabDiscoveryEngine (субгрант Horizon 2020) - розроблена автором методика порівняння систем дистанційних лабораторій (фреймворків для створення віддаленого доступу до апаратного забезпечення) була використана під час проєктування та розробки дистанційної лабораторії для дослідження перетворювачів постійного струму. Застосування методики дозволило провести аналітичне порівняння доступних рішень класу RLMS (Remote Laboratory Management System) за визначеними технічними та архітектурними критеріями. На основі результатів порівняльного аналізу було обрано та успішно впроваджено LabDiscoveryEngine як базовий фреймворк для створення інфраструктури віддаленої лабораторії.

Впровадження наукових результатів дисертації сприяло підвищенню ефективності вибору інструментальних засобів розробки, забезпечило надійність віддаленого керування апаратними модулями та дозволило пришвидшити процес побудови віддаленої лабораторії, використавши авторизацію та чергу користувачів, наявну в фреймворці.

2) По міжнародному проєкту DIGITRANS (Erasmus+ KA2) - розроблена автором методика порівняльного аналізу систем дистанційних лабораторій була використана на етапі проєктування інфраструктури віддаленого доступу до апаратних засобів (MCU та FPGA). Використання даної методики дозволило провести комплексний аналіз існуючих фреймворків та систем керування навчальними лабораторіями (RLMS) за критеріями рівню технологій, оновлення та підтримки, швидкодії в real-time режимі та простоти конфігурації. На основі отриманих результатів порівняльного аналізу було прийнято рішення про необхідність розробки власної спеціалізованої системи керування лабораторіями. Це призвело до створення своєї RLMS на базі технології контейнеризації (Docker) в НУ «Чернігівська політехніка», що забезпечило ізоляцію робочих середовищ та стабільний доступ до мікроконтролерів та програмованих логічних інтегральних схем.

Впровадження даної методики сприяло оптимізації архітектурних рішень проєкту DIGITRANS, забезпечивши високу надійність функціонування дистанційних лабораторій.

Проректор з наукової роботи
НУ «Чернігівська політехніка»



Анатолій ПРИСТУПА

Система управління якістю сертифікована
за ДСТУ ISO 9001:2015 (ISO 9001:2015, IDT)

The quality management system is certified according to the
ISO 9001:2015

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І
НАУКИ УКРАЇНИ



MINISTRY OF EDUCATION AND
SCIENCE OF UKRAINE

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ЧЕРНІГІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

тел. +38(0462) 665-103;
факс +38(0462) 665-105
E-mail: cstu@stu.cn.ua
www.stu.cn.ua
Код ЄДРПОУ 05460798

CHERNIHIV POLYTECHNIC
NATIONAL UNIVERSITY

вул. Шевченка, 95, Чернігів, 14035,
Україна

95, Shevchenko str., Chernihiv, 14035,
Ukraine

15.07.2026 № 202/ОС-1339

На № _____ від _____

ДОВІДКА

**про впровадження результатів дисертаційного дослідження
Байди Владислава Дмитровича на тему:
«Методи та інформаційна технологія діагностування відмов у
напівпровідникових перетворювачах електроенергії
на основі цифрових двійників»**

Результати дисертаційної роботи Байди В.Д., впроваджено в освітній процес Національного університету «Чернігівська політехніка», зокрема під час викладання навчальних курсів: «Мікропроцесорні системи» та «Джерела живлення телекомунікаційного обладнання» в процесі підготовки бакалаврів спеціальності 172 «Електронні комунікації та радіотехніка» використовується розроблена автором дистанційна лабораторія для дослідження перетворювачів постійного струму. Застосування дистанційної лабораторії дозволило студентам виконувати експериментальні дослідження на реальних апаратних стендах перетворювачів постійного струму у віддаленому режимі, спостерігати осцилограми сигналів напруги та струму у реальному часі та аналізувати поведінку силових кіл в умовах різних режимів роботи без необхідності фізичної присутності в лабораторії.

Впровадження результатів дисертації сприяло підвищенню якості практичної підготовки фахівців, забезпечило безперервний доступ до лабораторного обладнання під час дистанційного та змішаного форматів навчання.

Проректор з наукової роботи,
НУ «Чернігівська політехніка»



[Signature]
Анатолій ПРИСТУПА

Система управління якістю сертифікована
за ДСТУ ISO 9001:2015 (ISO 9001:2015, IDT)

The quality management system is certified according to the
ISO 9001:2015

Додаток Б. Побудова таблиці відповідності для перетворювача електроенергії

Для побудови таблиці відповідності було обрано $K = 3$, що означає, що для кожного параметра буде перевірено $2 \times 3 = 6$ різних можливих змін відповідного параметра. Таким чином, промодельовані будуть такі відносні зміни: «+», «+ +», «+ + +», «-», «- -» та «- - -».

Процес побудови виглядає наступним чином: створюється базова модель зі значеннями, вказаними в таблиці Б.1. Далі для кожного з вхідних параметрів (V_{in} , D , L і т.д.) по черзі створюється нова модель зі значенням відповідного параметру помноженим на відповідне до кожного з 6 коефіцієнтів числове значення, зазначених в таблиці Б.2. Іншими словами, $x_{2i} = x_{1i} \times \tau_{iq}$, де x_{2i} це i -й компонент вектора $\bar{X}_2$, x_{1i} це i -й компонент вектора $\bar{X}_1$, а τ_{iq} це значення з таблиці Б.2 для i -го компонента вектора $\bar{X}_2$ q -го коефіцієнту, де $q \in \{1, 2, \dots, 2K\}$. Вихідні значення кожної такої моделі порівнюються з вихідними значеннями базової моделі. Для побудови таблиці використовуються значення θ , що зображені в таблиці 2.4.

Таблиця Б.1

Значення параметрів моделі для побудови таблиці відповідності

Параметр	Значення для симуляції
Час наростання струму затвору транзистора, t_{Gr}	0.1007 нс
Час спаду струму затвору транзистора, t_{Gf}	82.65 нс
Опір каналу транзистора, R_{DSon}	3.316 пОм
Опір діода R_D	1 мкОм
Струм насичення діода I_S	2.423e-15 А
Опір конденсатора, R_C	0.0878 Ом
Індуктивність конденсатора, L_C	0.322 нГн

У таблиці Б.2, яка містить коефіцієнти для кожного зі ступенів зміни відповідного параметру, значення «0» в якості відносної зміни «- - -» слугують для симуляції граничних умов, коли компоненти на платі закорочені, але у деяких

випадках через програмні проблеми PySpice з використанням Ngspice значення «0» не оброблялися коректно, тому були встановлені малі значення, а саме «0.01», « 10^{-12} » та « 10^{-24} ». Аналогічно, для симуляції короткого замикання були використані великі значення опорів « 10^{18} » для значень, що відповідають відносній зміні «+ + +».

Задля забезпечення режиму безперервних струмів моделі, моделювання триває 5000 періодів, після чого аналізується лише останній період.

Таблиця Б.2

Множники, що відповідають відносним змінам для вхідних параметрів

---	--	-	+	++	+++
Вхідна напруга, V_{in}					
1/2	1/1.5	1/1.1	1.1	1.5	2
Коефіцієнт заповнення сигналу ШІМ, D					
10^{-6}	1/1.7	1/1.2	1.2	1.7	2
Індуктивність котушки, L					
0	1/10	1/1.2	1.2	10	100
Ємність конденсатора, C					
1/10000	1/100	1/1.5	1.5	100	10000
Опір навантаження, R_{load}					
0	1/5	1/1.1	1.25	5	10^{18}
Еквівалентний послідовний опір конденсатора, R_C					
0	1/100	1/5	5	100	10^{18}
Еквівалентний послідовний опір котушки індуктивності, R_L					
10^{-12}	1/100	1/5	5	100	10^{18}
Опір діода, R_D					
10^{-24}	1/1000	1/10	10	1000	10^{18}
Опір стік-витік відкритого транзистора, $R_{DS\ ON}$					
0	1/1000	1/10	10	1000	10^{18}

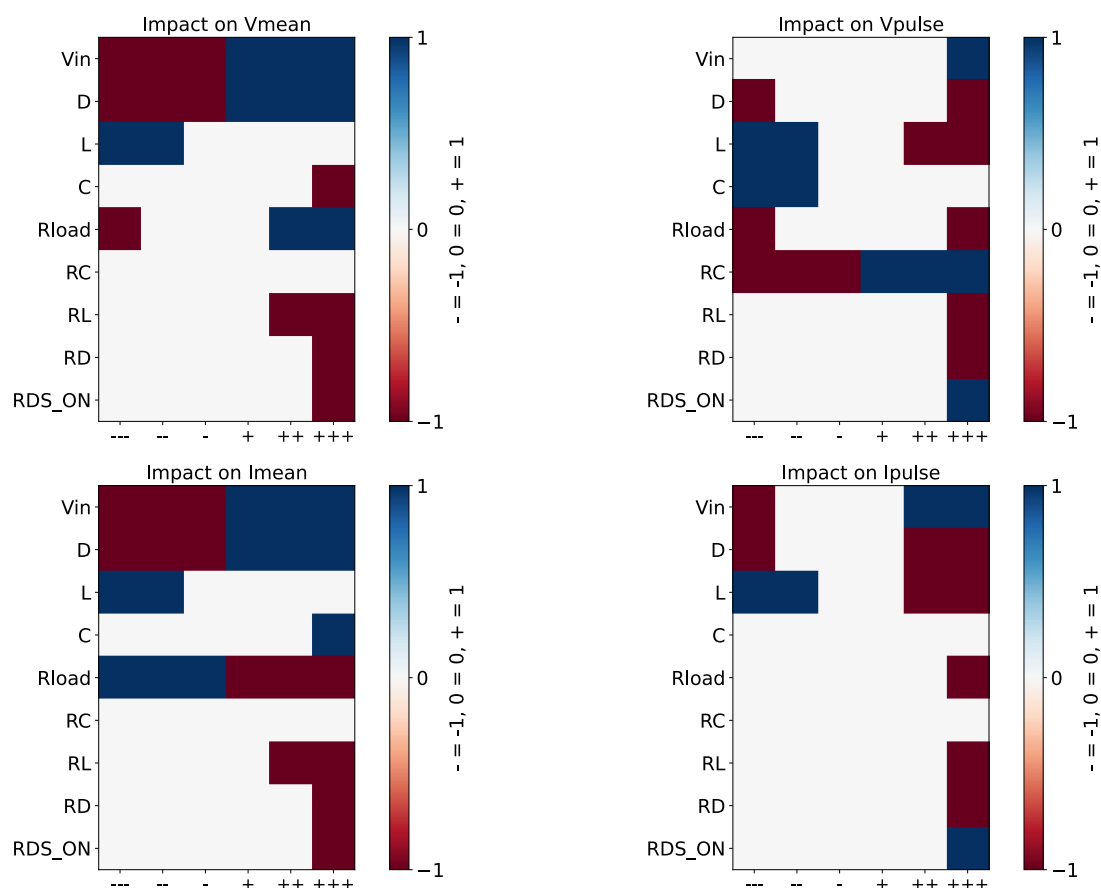


Рис.Б.1. Теплові карти впливу відносних змін вхідних значень на вихідні значення

На рисунку Б.1 зображено теплові карти, які відображають вплив відносних змін вхідних значень на вихідні значення. Білим кольором позначено відносну зміну «0» (тобто зміна нижче за порогове значення θ), червоним позначено відносну зміну «-», а синім – «+». Для прикладу розглянемо вплив значення індуктивності L на пульсації струму через котушку $I_{L\ pulse}$: можна бачити з теплової карти з підписом «Impact on I_{pulse} », що для відносних змін «---», «--», які відповідають коефіцієнтам 0 та $\frac{1}{10}$, відповідно, значення $I_{L\ pulse}$ збільшується достатньо щоб присвоїти відповідному компоненту вектора $\bar{R}$ значення «+». Аналогічно для відносних змін «++» та «+++», які відповідають коефіцієнтам 10 та 100 відповідно, значення $I_{L\ pulse}$ зменшується достатньо, щоб присвоїти відповідному компоненту вектора $\bar{R}$ значення «-».

В результаті отримано табличку відповідності, що зображена в таблиці Б.3

Таблиця відповідності

Вектор $\bar{R}$, відповідний до [$V_{out\ mean}$, $V_{out\ pulse}$, $I_{L\ mean}$, $I_{L\ pulse}$]	Вектор $\bar{E}$, відповідний до [V_{in} , D , L , C , R_{load} , R_C , R_L , R_D , $R_{DS\ on}$]
[++++]	[{++}, {0}, {--, ---}, {0}, {0}, {0}, {0}, {0}, {0}]
[+0++]	[{++}, {0}, {0}, {0}, {0}, {0}, {0}, {0}, {0}]
[+0+0]	[{+}, {+}, {0}, {0}, {0}, {0}, {0}, {0}, {0}]
[-0-0]	[{-, --}, {-, --}, {0}, {0}, {0}, {0}, {++}, {0}, {0}]
[-0--]	[{---}, {0}, {0}, {0}, {0}, {0}, {0}, {0}, {0}]
[+-+ -]	[{0}, {+++}, {0}, {0}, {0}, {0}, {0}, {0}, {0}]
[+0+-]	[{0}, {++}, {0}, {0}, {0}, {0}, {0}, {0}, {0}]
[----]	[{0}, {---}, {0}, {0}, {0}, {0}, {+++}, {+++}, {0}]
[0-0-]	[{0}, {0}, {++, +++}, {0}, {0}, {0}, {0}, {0}, {0}]
[0000]	[{0}, {0}, {+, -}, {+, ++, -}, {0}, {0}, {+, -, --, ---}, {+, ++, -, --, ---}, {+, ++, -, --, ---}]
[-0+0]	[{0}, {0}, {0}, {+++}, {0}, {0}, {0}, {0}, {0}]
[0+00]	[{0}, {0}, {0}, {--, ---}, {0}, {+, ++, +++}, {0}, {0}, {0}]
[+---]	[{0}, {0}, {0}, {0}, {+++}, {0}, {0}, {0}, {0}]
[+0-0]	[{0}, {0}, {0}, {0}, {++}, {0}, {0}, {0}, {0}]
[00-0]	[{0}, {0}, {0}, {0}, {+}, {0}, {0}, {0}, {0}]
[00+0]	[{0}, {0}, {0}, {0}, {-, --}, {0}, {0}, {0}, {0}]
[--+0]	[{0}, {0}, {0}, {0}, {---}, {0}, {0}, {0}, {0}]
[0-00]	[{0}, {0}, {0}, {0}, {0}, {-, --, ---}, {0}, {0}, {0}]
[-+-+]	[{0}, {0}, {0}, {0}, {0}, {0}, {0}, {0}, {+++}]

Додаток В. Тестування точності розробленої системи діагностування відмов

Тест відхилення коефіцієнту заповнення ШІМ. Можливою причиною неправильної поведінки перетворювача напруги є апаратні або програмні помилки в схемі керування транзистора. Однією з таких помилок може слугувати неправильно встановлений коефіцієнт заповнення сигналу ШІМ. Проаналізовано наступні відхилення коефіцієнту заповнення від очікуваного:

1. $D = 40$ замість 50:

Даний тест був виконаний над набором даних, що складається з 1991 вимірювання. Наступна таблиця містить результати цього тесту:

Таблиця В.1

Результати тесту відхилення коефіцієнту заповнення 40 замість 50

Вектор	Кількість випадків	Відсоток випадків від всього набору даних, %	Коментар
– 0 – 0	1988	99.8	Очікуваний
– 0 – +	3	0.2	Помилковий

Отже, у всіх 1991 випадках алгоритм коректно детектував наявність відмови, а в 99.8% випадків правильно була визначена конкретна причина.

2. $D = 45$ замість 50:

Таблиця В.2

Результати тесту відхилення коефіцієнту заповнення 45 замість 50

Вектор	Кількість випадків	Відсоток випадків від всього набору даних, %	Коментар
– 0 – 0	1127	99.7	Очікуваний
– 0 – +	3	0.3	Помилковий

3. $D = 1$ замість 50:

Таблиця В.3

Результати тесту відхилення коефіцієнту заповнення 1 замість 50

Вектор	Кількість	Відсоток випадків від всього	Коментар
--------	-----------	------------------------------	----------

	випадків	набору даних, %	
— 0 — 0	8584	99.8	Очікуваний
— — — 0	16	0.2	Помилковий, але при розширеному пошуку перетворюється на правильний вектор — — — —

Для даного тесту було зібрано 8600 вимірювань. З результатів видно, що в усіх 100% вимірюваннях алгоритмом було помічено некоректну поведінку, а також в 99.8% випадків було коректно визначено причину відхилення. В 0.2% випадків вектор $\bar{R}$ мав значення «— — — 0», який не має відповідного рядку в таблиці відповідності, але для правильного визначення причини відмови можливо було б використати підхід з розширеним пошуком в таблиці, що привело б до правильного визначення причини відмови. Така поведінка пов'язана з досить низькими значеннями пульсацій напруги, особливо при низьких значеннях середньої напруги, як, власне, і відбувалося в тесті, оскільки D було виставлено на рівні 1/100. При таких низьких пульсаціях зовнішні шуми мають більш вагомий вплив на розрахунки.

4. $D = 60$ замість 50

Таблиця В.4

Результати тесту відхилення коефіцієнту заповнення 60 замість 50

Вектор	Кількість випадків	Відсоток випадків від всього набору даних, %	Коментар
+ 0 + 0	1451	99.8	Очікуваний
+ 0 + +	3	0.2	Помилковий

Тест відхилення вхідної напруги. Іншою можливою причиною несправності може слугувати неправильна напруга на вході пристрою, тобто проблеми з живленням. Проаналізовано наступні відхилення вхідної напруги від очікуваної:

1. 10 В замість 12 В:

Таблиця В.5

Результати тесту відхилення вхідної напруги 10 В замість 12 В

Вектор	Кількість випадків	Відсоток випадків від всього набору даних, %	Коментар
– 0 – 0	3114	99.8	Очікуваний
– 0 – –	5	0.2	Очікуваний

2. 6 В замість 12 В:

Таблиця В.6

Результати тесту відхилення вхідної напруги 6 В замість 12 В

Вектор	Кількість випадків	Відсоток випадків від всього набору даних, %	Коментар
– 0 – –	630	57.2	Очікуваний
– 0 – 0	471	42.8	Очікуваний

По результатах цього тесту на 1013 вимірювання, алгоритм в усіх 100% правильно визначив конкретну причину відмови, хоч і майже з однаковою ймовірністю визначав один з двох векторів.

3. 14 В замість 12 В:

Таблиця В.7

Результати тесту відхилення вхідної напруги 14 В замість 12 В

Вектор	Кількість випадків	Відсоток випадків від всього набору даних, %	Коментар
+ 0 + 0	1533	74.9	Очікуваний
+ 0 + +	506	24.7	Очікуваний
+ 0 0 0	6	0.3	Помилковий
+ + + 0	1	<0.1	Помилковий
+ 0 0 +	1	<0.1	Помилковий

В даному тесті на 2047 вимірювання сумарно в 99.6% була правильно визначена

причина відмови. При цьому, 2 можливі вектори для даної причини були задіяні, що свідчить про високий вплив шумів вимірювання на визначення конкретного розміру зміни напруги на даний тест. Лише в 8 випадках з 2047 (~0.3%) вектор $\bar{R}$ мав значення, які не містяться в таблиці відповідності.

4. 18 В замість 12 В:

Таблиця В.8

Результати тесту відхилення вхідної напруги 18 В замість 12 В

Вектор	Кількість випадків	Відсоток випадків від всього набору даних, %	Коментар
+ 0 + +	1664	91.0	Очікуваний
+ 0 + 0	159	8.7	Очікуваний
+ + + +	5	0.3	Очікуваний

Цей тест був виконаний на 1828 вимірюваннях. У всіх 100% випадків конкретна причина відмови була визначена правильно. Показовим є те, що, у порівнянні з минулим тестом (14 В замість 12 В) відсоток випадків вектору «+ 0 + +» став помітно більшим, оскільки значення відхилення наблизилося до відносної зміни «+ +», відповідником якому і є вектор «+ 0 + +».

Тест відхилення опору навантаження. Ще однією можливою причиною некоректної поведінки може бути зміна опору навантаження. Для цього випадку було проведено наступні тести:

1. 2 Ом замість 4 Ом:

Таблиця В.9

Результати тесту відхилення опору навантаження 2 Ом замість 4 Ом

Вектор	Кількість випадків	Відсоток випадків від всього набору даних, %	Коментар
0 0 + 0	2560	99.8	Очікуваний
0 0 + +	5	0.2	Помилковий

2. 15 Ом замість 4 Ом:

Результати тесту відхилення опору навантаження 15 Ом замість 4 Ом

Вектор	Кількість випадків	Відсоток випадків від всього набору даних, %	Коментар
+ 0 – 0	417	100	Очікуваний

3. 5 Ом замість 4 Ом:

Результати тесту відхилення опору навантаження 5 Ом замість 4 Ом

Вектор	Кількість випадків	Відсоток випадків від всього набору даних, %	Коментар
0 0 – 0	1511	99.9	Очікуваний
0 0 – +	1	0.1	Помилковий

Тест відхилення ємності конденсатора.

Слід зазначити, що в тестах по ємності конденсатора не було можливості фізично змінити ємність конденсатора достатньо для цілей тесту, тому змінювалося не фактичне значення ємності, а «очікуване» цифровим двійником. В усіх тестах ємності (та індуктивності) використаний один і той самий набір даних.

Оскільки в цих тестах відхилення вноситься в параметр цифрового двійника, а не реального пристрою, ролі векторів Y_{meas} та Y_{DT} відносно таблиці Б.3 міняються місцями: таблицю побудовано для випадку, коли від базового значення відхиляється параметр пристрою. Тому очікуваним у таких тестах є вектор R, дзеркальний за знаками до відповідного рядка таблиці Б.3, а ступінь зміни визначається відношенням значення параметра у двійнику до фактичного. Наприклад, для тесту «10 мкГн замість 100 мкГн» двійник має індуктивність, збільшену в 10 разів («++»), чому в таблиці Б.3 відповідає рядок [0-0-], отже очікуваним є вектор [0+0+]. Аналогічно, для тестів «замість 0.1 мкГн» та «замість 1 мкГн» рядку [++++] відповідає очікуваний вектор [----], а для тестів ємності рядку [0+00] відповідає вектор [0-00].

1. 44 мкФ замість 0.0044 мкФ

Таблиця В.12

Результати тесту відхилення ємності конденсатора 44 мкФ замість 0.0044 мкФ

Вектор	Кількість випадків	Відсоток випадків від всього набору даних, %	Коментар
0 – 0 0	20644	99.5	Очікуваний
0 – 0 +	58	0.3	Помилковий
0 – – 0	42	0.2	Помилковий

2. 44 мкФ замість 0.44 мкФ

Таблиця В.13

Результати тесту відхилення ємності конденсатора 44 мкФ замість 0.44 мкФ

Вектор	Кількість випадків	Відсоток випадків від всього набору даних, %	Коментар
0 – 0 0	20702	99.8	Очікуваний
0 – – 0	41	0.2	Помилковий
0 – 0 +	1	<0.1	Помилковий

Тест відхилення індуктивності котушки.

Аналогічно до тестів ємності слід зазначити, що в тестах по індуктивності не було можливості фізично змінити індуктивність котушки, тому змінювалося не фактичне значення індуктивності, а «очікуване» цифровим двійником.

1. 10 мкГн замість 0.1 мкГн

Таблиця В.14

Результати тесту відхилення індуктивності котушки 10 мкГн замість 0.1 мкГн

Вектор	Кількість випадків	Відсоток випадків від всього набору даних, %	Коментар
– – – –	20744	100	Очікуваний

2. 10 мкГн замість 1 мкГн

Таблиця В.15

Результати тесту відхилення індуктивності котушки 10 мкГн замість 1 мкГн

Вектор	Кількість випадків	Відсоток випадків від всього набору даних, %	Коментар
— — — —	20744	100	Очікуваний

3. 10 мкГн замість 100 мкГн

Таблиця В.16

Результати тесту відхилення індуктивності котушки 10 мкГн замість 100 мкГн

Вектор	Кількість випадків	Відсоток випадків від всього набору даних, %	Коментар
0 + 0 +	20742	99.9	Очікуваний
0 + — +	2	0.1	Помилковий

4. 10 мкГн замість 1000 мкГн

Таблиця В.17

Результати тесту відхилення індуктивності котушки 10 мкГн замість 1000 мкГн

Вектор	Кількість випадків	Відсоток випадків від всього набору даних, %	Коментар
0 + 0 +	20743	99.9	Очікуваний
0 + — +	1	0.1	Помилковий

Тест без відхилень.

Окрім тестів, що перевіряють коректність детектування якоїсь відмови або проблеми, було проведено тест з коректною поведінкою (без відхилень) щоб переконатися, що алгоритм не має помилкових спрацювань. Тест виконувався на 20744 вимірюваннях. Результати тесту наведені у таблиці В.18:

Результати тесту без відхилень

Вектор	Кількість випадків	Відсоток випадків від всього набору даних, %	Коментар
0 0 0 0	20696	99.8%	Очікуваний
0 – 0 0	31	0.1	Помилковий
0 0 0 +	17	0.1	Помилковий

Як видно з результатів, в 99.8% вимірюваннях алгоритм спрацював правильно і не надав помилково позитивні результати.

Додаток Г. Розв'язок та результат марковської моделі готовності

Стаціонарний розподіл ймовірностей станів має вигляд:

$$\pi = (\pi_0, \pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4), \quad (\text{Г.1})$$

де π_i це ймовірність відповідного S_i .

Коефіцієнт готовності обчислюється як сумарна ймовірність працездатних станів:

$$A = \pi_0 + \pi_1. \quad (\text{Г.2})$$

Динаміка ймовірностей станів $\pi(t) = (\pi_0(t), \dots, \pi_4(t))$ описується системою диференціальних рівнянь Колмогорова:

$$\frac{d\pi(t)}{dt} = \pi(t)Q, \quad (\text{Г.3})$$

де Q – матриця інтенсивностей переходів, елементи q_{ij} якої (крім елементів на діагоналі) відповідають інтенсивностям переходів на графі рис. 5.8, а діагональні елементи визначаються як $q_{ii} = -\sum_{i \neq j} q_{ij}$.

Оскільки процес є ергодичним, у стаціонарному режимі ($d\pi/dt = 0$) система (Г.3) зводиться до системи лінійних алгебраїчних рівнянь:

$$\pi Q = 0, \sum \pi_i = 1 \quad (\text{Г.4})$$

Вхідні дані моделі

Значення вхідних параметрів та їх обґрунтування наведено в таблиці Г.1. Частина параметрів отримана з експериментальних результатів даної роботи, а частина – з даних виробників компонентів і опублікованих джерел. Параметри, для яких прямі статистичні дані відсутні, прийнято на основі інженерних міркувань і в подальшому для них проведено аналіз чутливості (додаток Д). Значення, що стосуються системи з онлайн-діагностуванням, обрано консервативно (на користь базової системи, а не системи з діагностуванням), що підвищує об'єктивність і неупередженість даного моделювання.

Вхідні параметри моделі готовності

Параметр	Значення	Обґрунтування
c	0.995	Діагностичне покриття. Найгірше значення експериментально отриманої точності локалізації причини.
$T_{\text{вияв}}$	24 години	Час від виникнення несправності до досягнення відхиленнями вихідних параметрів помітного для діагностики рівня.
$1/\lambda_{\text{дег}}$	20000 годин	Напрацювання до виникнення латентної відмови. Ресурс електролітичних конденсаторів за даними виробників (1000-10000 годин при 105 градусів з перерахунком за правилом Арреніуса на реальні робочі температури 65-85 °C) [143]
$1/\lambda_{\text{рапт}}$	100000 годин	Оцінка на основі прогнозів надійності перетворювачів постійного струму [144]
$1/\lambda_{\text{розв}}$	1000 годин	Середина типового діапазону Р-Ф інтервалів (несправність вже можна виявити, але пристрій ще виконує свою функцію) деградаційних механізмів (від днів до місяців) [145]
$p_{\text{кат.рапт}}$	0.3	Частка катастрофічних сценаріїв серед раптових відмов
$p_{\text{кат.дег}}$	0.4	Частка невиявлених латентних відмов із катастрофічним завершенням (КЗ конденсатора, тепловий розгін, вторинні пошкодження – описано в розділі 1)
$T_{\text{відн.ф (базова)}}$	24 години	Ручна локалізація причини, логістика, заміна.
$T_{\text{відн.ф}}$ (з	8 годин	Причина локалізована автоматично. Залишаються

діагностуванням)		логістика, заміна та перевірка. У частці (1 – с) випадків хибної локалізації робиться відкат до ручного пошуку (24 години)
$p_{\text{неодн}}$	0.3	Частка випадків, коли таблиця відповідності повертає набір із 2 або більше компонентів-кандидатів
$T_{\text{звуж}}$	4 години	Час ручного звуження неоднозначності $p_{\text{неодн}}$ – інструментальна перевірка всіх названих кандидатів
$T_{\text{відн.кат}}$	72 години	Ремонт множинних пошкоджень. Прийнято однаково для обох систем
$T_{\text{план}}$	4 години	Тривалість планової заміни із заздалегідь замовленою запасною частиною

Результати моделювання

Стационарні розподіли ймовірностей станів для обох конфігурацій (базової системи та системи з діагностикою) наведено в таблиці Г.2, підсумкові показники готовності – в таблиці Г.3.

Таблиця Г.2

Стационарні ймовірності станів

Стан	Базова система	З онлайн-діагностуванням
S_0 (Справна робота)	0.950079	0.998250
S_1 (Латентна несправність)	0.047504	0.001176
S_2 (Функціональна відмова)	8.44e-4	7.14e-5
S_3 (Катастрофічна відмова)	1.57e-3	2.49e-4
S_4 (Планова заміна)	—	2.53e-4

Показники готовності та надійності

Показник	Базова система	З онлайн-діагностуванням	Ефект
Коефіцієнт готовності А	0.997583	0.999426	Зниження неготовності (1 – А) у 4.2 раза
Середній простій, годин/рік	21.2	5.0	У 4.2 раза менше
Частота незапланованих відмов, 1/рік	0.499	0.098	У 5.1 раза менше
Частота катастрофічних відмов, 1/рік	0.191	0.030	У 6.3 рази менше
Системний MTBF (незаплановані відмови), годин	17500	89570	У 5.1 раза більше
Ефективний MTTR, годин	42.4	28.8	У 1.5 раза менше
Частота планових замін за сигналом діагностики, 1/рік	—	0.427	Додаткові короткі планові втручання

З таблиці Г.3 видно механізм підвищення готовності: у базовій системі перетворювач проводить близько 4.8% часу у стані латентної несправності S1, з якого єдиним виходом є незапланована відмова, причому у 40% випадків вона є катастрофічною. У системі з онлайн-діагностуванням ймовірність перебування в S1 знижується більш ніж на порядок (до 0.12%), оскільки несправність виявляється в

середньому за 24 години та усувається плановою заміною (4 години, з урахуванням можливого звуження неоднозначності – у середньому 5.2 години). Внаслідок цього потік незапланованих відмов зменшується у 5.1 раза, а сумарний річний простій скорочується з 21.2 до 5 годин.

Обмеження запропонованої моделі

Модель має наступні обмеження. По-перше, прийнято експоненційний розподіл часів перебування в усіх станах. Для часів відновлення та R-F інтервалів реальні розподіли можуть відрізнятися, і уточнення є перехід до напівмарковської моделі, що є напрямком подальших досліджень. По-друге, інтенсивності відмов прийнято за даними виробників та стандартів прогнозування надійності, а не за польовою статистикою конкретного виробу. З огляду на це результати слід інтерпретувати як порівняльні (відношення показників двох конфігурацій), а не як абсолютні прогнози, саме порівняльний характер висновку і підтверджено аналізом чутливості. По-третє, модель описує одиничний перетворювач, а для систем з резервуванням простір станів має бути розширений. Крім того, модель не нараховує витрат за хибні локалізації (заміна справного компонента при наявній несправності в іншому, зниження довіри персоналу), тому для розробленої системи з точністю локалізації 99.5-100 % цей внесок нехтовно малий, проте при застосуванні моделі до систем з низьким покриттям його слід враховувати додатково (детальніше в додатку Д). По-четверте, розроблена діагностична система виявляє латентні несправності за фактом досягнення відхиленнями помітного рівня, але не здійснює прогнозування залишкового ресурсу за трендами деградації. Розширення методів у бік прогностики є перспективою подальших досліджень і, як впливає з аналізу чутливості, додатково збільшить ефект підвищення готовності. По-п'яте, модель не враховує хибних спрацювань діагностичної системи (позначення справного пристрою як несправного), які призводили б до необґрунтованих планових втручань. По-шосте, модель припускає, що механізми несправностей, які виникають при експлуатації, належать до множини несправностей, охопленої таблицею відповідності. Для несправності, вектор напрямків відхилень якої відсутній у таблиці, діагностична система не виконує локалізацію причини, позначаючи результат як такий, що не має збігу. Слід

підкреслити, що факт наявності несправності при цьому все одно виявляється: детекція ґрунтується на перевищенні відхиленнями порогових значень θ відносно еталонних сигналів цифрового двійника і не залежить від пошуку в таблиці (експериментально 100 % виявлення факту відмови). Тому навіть для неохоплених таблицею несправностей зберігається основний механізм підвищення готовності – раннє попередження та планове втручання до настання відмови. Втрачається лише автоматична локалізація, і пошук причини в межах планового втручання виконується вручну (у термінах моделі це відповідає переходу $S1 \rightarrow S4$ зі збільшеною тривалістю $T_{\text{план}}$). Розширення словника несправностей таблиці та кількісне оцінювання його повноти є напрямком подальших досліджень.

Додаток Д. Аналіз чутливості марковської моделі готовності

Оскільки частина вхідних параметрів прийнята на основі інженерних оцінок, виконано аналіз чутливості результату до їх варіації в межах щонайменше порядку величини (таблиця Д.1). Критерієм слугує кратність зниження неготовності $K = \frac{1-A_{\text{баз}}}{1-A_{\text{діаг}}}$.

Таблиця Д.1

Чутливість результату до варіації параметрів

Параметр	Діапазон варіації	K (кратність зниження неготовності)
c	0.8 ... 1.0	3.98 ... 4.21
$T_{\text{вияв}}$	1 ... 720 годин	4.46 ... 2.14
$1/\lambda_{\text{розв}}$	200 ... 5000 годин	3.61 ... 4.21 (немонотонна)
$p_{\text{кат.дег}}$	0.1 ... 0.8	3.14 ... 5.51
$T_{\text{план}}$	2 ... 24 години	5.07 ... 1.56
$p_{\text{неодн}}$	0 ... 1	4.77 ... 3.30
$T_{\text{звуж}}$	2 ... 8 годин	4.47 ... 3.76
$T_{\text{відн.ф}}$	8 ... 24 години	4.21 ... 3.47

В усьому дослідженому діапазоні параметрів виконується $A_{\text{діаг}} > A_{\text{баз}}$. Зокрема, навіть у гіпотетичному випадку, коли кожен результат локалізації є неоднозначним ($p_{\text{неодн}} = 1$), ефект зберігається ($K = 3.30$), оскільки звуження пошуку до 2-3 названих компонентів все одно помітно коротше за пошук причини по всій схемі. Додатково розглянуто стрес-сценарій з одночасно найгіршими значеннями п'яти параметрів ($T_{\text{вияв}} = 720$ годин, $T_{\text{план}} = 24$ години, $c = 0.8$, $p_{\text{неодн}} = 1$, $T_{\text{звуж}} = 8$ годин): навіть у цьому випадку готовність системи з онлайн-діагностуванням залишається вищою за базову ($A = 0.997907$ проти 0.997583). Отже, якісний висновок про

підвищення готовності є стійким до невизначеності вхідних даних, а варіація параметрів впливає лише на кількісний масштаб ефекту.

Помірну чутливість результату до діагностичного покриття c ($K = 3.98$ при $c = 0.8$ проти $K = 4.21$ при $c = 0.995$) слід інтерпретувати коректно. Вона не означає, що точність діагностування є другорядною. По-перше, у частині запобігання відмовам низьке покриття частково компенсується безперервністю онлайн-моніторингу (якщо несправність була пропущена в одному циклі, то вона може бути виявлена наступними циклами, оскільки відхилення з часом зростають), і модель відтворює саме цей механізм. Він, однак, передбачає незалежність послідовних спроб, що є обґрунтованим для системи з високою базовою точністю і оптимістичним для систем з низькою. По-друге, модель не нараховує витрат за хибні локалізації, які для системи з низькою точністю стали б визначальними: заміну справних компонентів (простій і витрати без усунення причини) та зниження довіри експлуатаційного персоналу до діагностичних сигналів, без якої канал планових замін не функціонує. Ці чинники суттєві саме при малих c , тому область $c < 0.9$ слід розглядати як межу застосовності моделі, а не як свідчення допустимості неточної діагностики. Висока експериментальна точність локалізації (99.5-100 %) є передумовою коректності самої моделі. По-третє, точність безпосередньо входить у час відновлення після відмови (через відкат до ручного пошуку в частці $(1 - c)$ випадків), що й зумовлює зниження K при зменшенні c у таблиці Д.1.

Додаток Е. Список праць здобувача за темою дисертації

Наукові праці з основними науковими результатами дисертації

1. V. Baida, O. Velihorskyi, M. Khomenko, B. Velihorskyi. Back-End Technology of the Remote Power Electronics Laboratory Based on LabDiscoveryEngine, Mathematical Modeling and Simulation of Systems. MODS 2024. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 1391., 2025, Springer, Cham. pp.379-392. https://doi.org/10.1007/978-3-031-90735-7_29, Scopus, Web of Science (ISSN 2367-3370). *(Особистий внесок здобувача: розробка багаторівневої архітектури бекенду віддаленої лабораторії, обґрунтування вибору технології Node.js, проєктування прикладних протоколів двонаправленого обміну даними між клієнтом, сервером та мікроконтролером, реалізація інтеграції з RLMS LabDiscoveryEngine, реалізація взаємодії Raspberry Pi з цифровим осцилографом Analog Discovery 2).*
2. Велігорський, Б., Байда, В., Хоменко, М. Практичні аспекти створення інтерфейсу користувача віддаленої лабораторії електроніки, Технічні науки та технології, 2025, №1 (39), 206–217. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-1\(39\)-206-217](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-1(39)-206-217), Фахове видання, (ISSN 2411-5363). *(Особистий внесок здобувача: розробка серверної частини віддаленої лабораторії, проєктування архітектури системи, налаштування середовища розробки та ініціалізація фронтенд-застосунку як частини монорепозиторію).*
3. В. Байда, О. Велігорський. Методика порівняння інформаційних технологій побудови дистанційних лабораторій апаратного забезпечення, Технічні науки та технології, 2024, №4 (38), с. 172-188. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-4\(38\)-172-188](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-4(38)-172-188), Фахове видання, (ISSN 2411-5363). *(Особистий внесок здобувача: аналіз та систематизація архітектур існуючих систем дистанційних лабораторій апаратного забезпечення, розробка методики їх порівняння за комплексом критеріїв з ваговими коефіцієнтами, проведення порівняльного аналізу та обґрунтування вибору оптимальної технології).*
4. В. Байда, О. Велігорський. Методологія діагностики апаратного забезпечення з використанням інформаційної технології цифрового

- двійника, Технічні науки та технології, 2025, №2 (40), с. 234-253. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2\(40\)-234-253](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-234-253), Фахове видання, (ISSN 2411-5363). *(Особистий внесок здобувача: розробка методики діагностики електронного обладнання на основі векторного представлення параметрів, формалізація таблиць відповідності та механізму сірої зони, розробка алгоритму реалізації методики, систематизація методів генерації таблиць відповідності).*
5. В. Байда, О. Велігорський Ідентифікація паразитних параметрів моделі перетворювача постійного струму генетичним алгоритмом, Технічні науки та технології, 2025, №4 (42), с. 165-186, [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4\(42\)-165-186](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4(42)-165-186), Фахове видання, (ISSN 2411-5363). *(Особистий внесок здобувача: розробка методу ідентифікації паразитних параметрів моделі перетворювача постійного струму, реалізація генетичного алгоритму з багатокритеріальною функцією пристосованості, проведення експериментальних вимірювань та статистичного аналізу даних, верифікація оптимізованої моделі на експериментальній вибірці).*
6. В. Байда, О. Велігорський Розробка та практична імплементація інформаційної технології діагностики перетворювачів постійного струму на основі фізично-орієнтованих цифрових двійників, Технічні науки та технології, 2026, №1(43), с. 161–182. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1\(43\)-161-182](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-161-182), Фахове видання, (ISSN 2411-5363). *(Особистий внесок здобувача: розробка математичної моделі перетворювача з урахуванням паразитних параметрів у PySpice, формування таблиці відповідності через моделювання шести ступенів відносних змін параметрів, практична імплементація та експериментальна валідація методології діагностики на базі 6705 вимірювань у системі дистанційної лабораторії LabDiscoveryEngine).*

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

1. Байда В., Іванець С. Віддалені лабораторії по роботі з апаратними засобами вбудованих систем. Новітні технології у науковій діяльності і навчальному

- процесі: Збірник тез Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих учених (м. Чернігів, 19-20 квіт. 2023 р.): збірник тез доповідей – Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2023. – С. 247-249. *(Особистий внесок здобувача: обґрунтовано доцільність створення дистанційних лабораторій для роботи з апаратними засобами, виконано огляд та порівняльний аналіз існуючих платформ віддалених лабораторій, визначено їх функціональні можливості, архітектурні рішення та особливості організації доступу до реального обладнання).*
2. Байда В., Іванець С. Implementation of the server part of a remote power electronics laboratory based on the labdiscoveryengine system. Юність науки – 2024: збірник тез доповідей XIV Міжнар. наук.-практ. конф. студ., асп. і мол. вчен. (м. Чернігів, 24-26 квіт. 2024 р.). – Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2024. – С. 1046-1047. *(Особистий внесок здобувача: розроблення архітектури та програмна реалізація серверної частини віддаленої лабораторії силової електроніки на Raspberry Pi, обґрунтування вибору протоколу WebSocket та реалізація власного протоколу обміну (що використовує UART) з мікроконтролером STM32 для керування перетворювачем постійного струму).*
 3. V. Baida, S. Ivanets. Building a Virtual Hardware Laboratory with FPGA and Raspberry Pi Integration. V International Scientific and Practical Conference «Theoretical and Applied Aspects of Device Development on Microcontrollers and FPGAs» MC&FPGA-2023, Kharkiv, Ukraine, June 22-23, 2023. – Kharkiv, NURE. – 36-37 pp. *(Особистий внесок здобувача: запропоновано архітектуру браузерної системи віддаленої лабораторії FPGA, обґрунтовано вибір Raspberry Pi як апаратної платформи та розроблено структурну схему взаємодії сервера, Raspberry Pi і FPGA).*
 4. Baida V.D., Velihorskyi O.A., Kazymyr V.V. Laboratory platform for remote hardware experimentation., Науково-практична конференція обдарованої учнівської та студентської молоді «Новітні технології сучасного суспільства НТСС-2024», Національний університет «Чернігівська політехніка», 2024,

- С. 185-186. (*Особистий внесок здобувача: розроблення архітектури платформи віддаленої лабораторії та реалізація її серверної частини на Go з підтримкою дистанційного програмування MCU/FPGA і керування Analog Discovery 2*).
5. O. Velihorskyi, M. Khomenko, V. Baida, B. Velihorskyi, R. Chakirov, DC-DC Power Converters Remote Laboratory Based on LabDiscoveryEngine, 2025 IEEE PES 35th Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), 29 September - 01 October 2025, pp. 1-5, <https://doi.org/10.1109/AUPEC66173.2025.11219557> Scopus, Web of Science (ISSN 2474-1507). (*Особистий внесок здобувача: розробка серверної частини дистанційної лабораторії, реалізація двонаправленого обміну даними між вебклієнтом, експериментальним сервером на базі Raspberry Pi та мікроконтролером за протоколом WebSocket з використанням підходу Data Transfer Objects, інтеграція дистанційної лабораторії з RLMS LabDiscoveryEngine, реалізація програмної взаємодії з Analog Discovery 2 та потокової передачі осцилографічних даних у вебінтерфейс*).