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, 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, 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, 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, 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, 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.