ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу
Байди Владислава Дмитровича
на тему «Методи та інформаційна технологія діагностування відмов у напівпровідникових перетворювачах електроенергії на основі цифрових двійників», представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 12 «Інформаційні технології» за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки»

Актуальність теми дисертації

Стрімке зростання складності сучасних кіберфізичних систем, інфраструктурних комплексів критичного призначення, відновлюваної енергетики, аерокосмічної галузі, телекомунікаційного устаткування та автономного електротранспорту висуває безпрецедентно високі вимоги до надійності та безперервності функціонування вузлів силової електроніки. Базовою ланкою енергетичної інфраструктури таких систем виступають напівпровідникові перетворювачі електроенергії (зокрема перетворювачі постійного струму), раптовий вихід із ладу яких може спричинити каскадні системні аварії, колосальні матеріальні збитки та створити суттєві ризики техногенного характеру.

Традиційні підходи до технічної діагностики силового обладнання здебільшого орієнтовані на виявлення грубих катастрофічних відмов (коротке замикання, обрив кола) вже після їх виникнення або ж вимагають введення суттєвої фізичної та апаратної надлишковості (монтажу додаткових внутрішніх сенсорів струму, напруги та температури безпосередньо у вузлах комутації). В умовах високої щільності поверхневого монтажу компонентів, зростання робочих частот комутації та наявності захисних герметичних корпусів прямий фізичний доступ до внутрішніх елементів стає неможливим, а паразитні параметри схеми починають домінувати у динамічній поведінці пристрою, спричиняючи приховану деградацію елементів («м'які відмови»).

У зв'язку з цим надзвичайно актуальною науково-прикладною задачею є перехід від інвазивного контролю до інформаційних технологій неінвазивного моніторингу та діагностування на основі цифрових двійників пристроїв (Digital Twins). Дисертаційна робота Байди В. Д. присвячена розв'язанню важливого наукового завдання комп'ютерних наук – розробленню нових методів та інформаційної технології онлайн-виявлення та ідентифікації відмов у напівпровідникових перетворювачах електроенергії шляхом поєднання метаевристичного калібрування цифрового двійника під конкретний екземпляр фізичного пристрою, якісного аналізу відхилень вихідних сигналів для локалізації несправностей та технологій дистанційних лабораторій для експериментальної валідації. Своєчасність та висока практична цінність означеного напряму досліджень підтверджується його безпосереднім зв'язком з пріоритетними напрямами розвитку інформаційних технологій та сучасними концепціями Industry 4.0.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертація була виконана в Національному університеті «Чернігівська політехніка» за пріоритетними напрямами 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).

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 метаевристично 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.

Практичні результати дослідження впроваджено під час виконання міжнародних наукових проєктів Horizon Europe («Lab Discovery Engine») та ERASMUS+ («DIGITRANS»), а також в освітній процес НУ «Чернігівська політехніка» за спеціальністю 172 «Електронні комунікації та радіотехніка».

Ступінь обґрунтованості та достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій

Дисертаційна робота Байди В. Д. виконана на високому науковому та методичному рівні. Обґрунтованість наукових положень забезпечується коректним використанням фундаментальних положень комп'ютерних наук, математичного моделювання фізичних процесів у середовищах схемотехнічного аналізу, методів метаевристичної оптимізації, теорії ймовірностей, векторної алгебри, методів теорії надійності та марковських випадкових процесів, а також теорії прийняття рішень.

Достовірність отриманих результатів підтверджується суворим математичним доведенням вихідних співвідношень, узгодженістю теоретичних положень із результатами комп'ютерного моделювання, представницьким обсягом натурних експериментів (оброблено понад 20700 вимірювань для калібрування та 6705 вимірювань для перевірки точності алгоритму діагностики на реальному стенді), а також високою точністю виявлення відмов (100%) та локалізації їх причин (99,5–100%). Результати досліджень не суперечать відомим положенням сучасної науково-технічної літератури та пройшли широку публічну апробацію.

Оцінка структури та змісту дисертації

Дисертаційна робота Байди В. Д. має чітку та логічну структуру, викладена на 234 сторінках комп'ютерного тексту і складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, переліку умовних позначень (4 стор.), списку використаних джерел зі 156 найменувань (20 стор.) та 6 додатків на 26 сторінках. Текст роботи містить 39 рисунків (та 3 у додатках) і 18 таблиць (та 25 у додатках). Загальний обсяг основного тексту становить 169 сторінок, що повністю відповідає встановленим вимогам до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки».

У *вступі* обґрунтовано актуальність наукової задачі, визначено об'єкт, предмет, мету та задачі дослідження, висвітлено наукову новизну й практичне значення результатів, наведено відомості про зв'язок роботи з науковими проєктами, особистий внесок здобувача, апробацію матеріалів дисертації та публікації.

У *першому розділі* виконано всебічний критичний аналіз сучасних підходів до технічної діагностики електронного обладнання. Проаналізовано специфіку несправностей силової електроніки, обмеження традиційних структурних методів (BIST, JTAG, ICT), можливості інтелектуальних підходів на основі машинного та глибинного навчання (CNN, LSTM, автоенкодери) та фізично-інформованих мереж (PINN). Розглянуто концепцію цифрових двійників, методи їх створення на основі SPICE-моделей та проблеми ідентифікації паразитних параметрів. Досліджено стан розвитку дистанційних лабораторій і констатовано відсутність об'єктивних методів їх багатокритеріального порівняння, на основі чого аргументовано сформульовано задачі дослідження.

У *другому розділі* розроблено теоретичні засади нового інтегрованого методу векторного онлайн-діагностування. Запропоновано подання режимів роботи схеми у вигляді вхідних та вихідних векторів, операцію адамарового ділення для нормалізації різниць, механізм конфігурованої «сірої зони» для відсікання вимірювальних шумів та формалізовано таблицю відповідності з дискретними ступенями деградації. Систематизовано та порівняно методи генерації таблиць (систематичне моделювання, аналітичний вивід, експертний, експериментальний, гібридний). Побудовано програмну модель понижуючого buck-перетворювача в PySpice/Ngspice.

У *третьому розділі* розв'язано задачу параметричної ідентифікації та калібрування цифрового двійника. Здійснено детальний порівняльний аналіз градієнтних методів, алгоритму рою частинок (PSO), алгоритму сірого вовка (GWO) та обґрунтовано переваги генетичного алгоритму (GA). Впроваджено

логарифмічне кодування генів та оригінальний критерій вибору еталонного вимірюваного сигналу за рівновіддаленістю від меж вибірки. Показано, що це забезпечує симетричність нев'язки та дозволяє безпосередньо використовувати отримані відхилення як початкові пороги сірої зони діагностування.

У *четвертому розділі* запропоновано технологічні підходи до формування середовища верифікації на основі дистанційних лабораторій. Розроблено метод багатокритеріального оцінювання технологій побудови лабораторій за системою з 6 зважених критеріїв. На основі розрахунків визначено платформу LabDiscoveryEngine як найбільш придатну для інтеграції з цифровими двійниками у задачах силової електроніки.

У *п'ятому розділі* представлено експериментальну верифікацію та практичну реалізацію діагностичного комплексу. Описано архітектуру бекенду на Node.js, протоколи обміну WebSocket/UART, взаємодію з приладом Analog Discovery 2 та платою перетворювача на базі STM32. Наведено результати масштабного тестування (понад 6700 експериментів), що підтвердили 100% виявлення відмов і 99,5–100% точності локалізації причин при тривалості діагностичного циклу до 1,5 мс. За допомогою побудованої марковської моделі доведено суттєве підвищення коефіцієнта готовності перетворювача.

У *висновках* дисертації узагальнено основні наукові та практичні результати дослідження, які повною мірою відповідають поставленим задачам та досягають визначеної мети.

Повнота викладу результатів дисертації в опублікованих працях

Основні теоретичні положення, наукові результати, алгоритмічні рішення та висновки дисертаційного дослідження достатньо повно висвітлені в 11 наукових працях, які підготовлені здобувачем одноосібно та у співавторстві. Серед них 5 статей у наукових фахових виданнях України категорії «Б» (журнал «Технічні науки та технології»), 1 наукова праця у закордонному виданні (Springer, серія

Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 1391), що проіндексована у міжнародних наукометричних базах Scopus та Web of Science Core Collection, 5 публікацій у збірниках матеріалів та тез доповідей міжнародних та всеукраїнських науково-практичних конференцій, зокрема 1 доповідь у матеріалах конференції IEEE PES AUPEC 2025, що індексується Scopus та Web of Science. Опубліковані праці відображають основний зміст усіх розділів дисертації. Особистий внесок здобувача у працях, опублікованих у співавторстві, зазначено у дисертації.

Відповідність академічній доброчесності

Дисертаційна робота Владислава Дмитровича Байди є самостійним завершеним науковим дослідженням. У роботі коректно наведено посилання на всі використані ідеї, математичні співвідношення та результати інших авторів. Факти академічного плагіату, фабрикації чи фальсифікації даних у дисертації відсутні. Здобувачем відкрито наведено декларацію про використання допоміжних інструментів штучного інтелекту під час підготовки рукопису (для бібліографічного пошуку відкритих джерел, генерації коду скриптів візуалізації мовою Python та формування переліку позначень), що відповідає сучасним етичним вимогам та підтверджує відповідальне дотримання автором принципів академічної доброчесності.

Дискусійні положення та зауваження до дисертації

Високо оцінюючи загальний рівень, наукову новизну та практичну спрямованість дисертаційного дослідження Байди В. Д., вважаю за необхідне висловити низку зауважень та дискусійних питань:

1. У другому розділі автор розглядає діагностику на основі гіпотези про виникнення виключно одиничних дефектів компонентів (параметричного дрейфу одного елемента). Проте в реальних умовах промислової експлуатації через температурні циклування, вібрації та теплове старіння часто спостерігається

деградація декількох елементів одночасно (наприклад, супутнє зростання ESR вихідного конденсатора та збільшення активного опору обмотки котушки індуктивності). Було б доцільно показати, яким чином запропонована таблиця відповідності та векторний метод можуть масштабуватися на випадок множинних взаємопов'язаних відмов або які обмеження при цьому виникають.

2. При формуванні початкових діагностичних порогів сірої зони θ (розділи 2 та 3, табл. 2.4) калібрування цифрового двійника виконувалося для фіксованого номінального робочого режиму (Vin = 12 В, D = 50%, Rload = 4 Ом). У дисертації недостатньо розкрито питання адаптивності встановлених порогових значень: чи залишаються вони інваріантними при істотних змінах шпаруватості ШІМ (D) чи опору навантаження під час реальної роботи, чи система потребує динамічної адаптації вектора порогів θ залежно від поточної робочої точки.

3. У третьому розділі для ідентифікації семи паразитних параметрів схеми застосовано генетичний алгоритм із логарифмічним кодуванням генів. З огляду на стохастичний характер роботи еволюційних метаевристик, у тексті роботи бажано було б навести дані щодо статистичної стійкості результатів оптимізації (наприклад, дисперсію значень знайдених паразитних параметрів або розкид функції пристосованості на серії з 20–30 незалежних прогонів алгоритму), а також детальніше описати обчислювальні витрати часу на етапі офлайн-калібрування.

4. У четвертому розділі при розробленні методу багатокритеріального порівняння технологій дистанційних лабораторій запропоновано систему з 6 критеріїв із відповідними ваговими коефіцієнтами. Проте в тексті недостатньо детально розкрито процедуру визначення саме цих числових значень вагових коефіцієнтів (чи проводилося формалізоване опитування експертів із розрахунком коефіцієнтів конкордації, чи вагові коефіцієнти призначалися на основі евристичних міркувань автора).

5. У п'ятому розділі при експериментальному тестуванні системи на апаратному макеті перетворювача (підрозділ 5.2) отримано високі показники

точності виявлення відмов (100%) та локалізації їх причин (99,5–100%) за 17 дослідженими сценаріями. Водночас експерименти проводилися для стаціонарних усталених режимів роботи. Було б доцільно уточнити, наскільки збережеться така висока розпізнавальна здатність методу в умовах різких динамічних перехідних процесів (наприклад, стрибкоподібних змін напруги живлення чи навантаження), а також при впливі значних зовнішніх електромагнітних завад, рівень яких може виходити за межі налаштованої «сірої зони».

6. У тексті дисертації трапляються окремі стилістичні та редакційні огріхи, зокрема, сленгові вирази на кшталт «табличка відповідності» у підрозділах 2.4–2.5, а також несуттєві неточності в оформленні підписів до окремих схем, що, втім, не заважає загальному сприйняттю наукового матеріалу.

Висловлені зауваження та дискусійні питання мають рекомендаційний характер, спрямовані на окреслення перспектив подальшого розвитку наукового напряму і не знижують високої наукової та практичної цінності дисертаційної роботи.

Загальні висновки

Дисертаційна робота Байди Владислава Дмитровича на тему «Методи та інформаційна технологія діагностування відмов у напівпровідникових перетворювачах електроенергії на основі цифрових двійників» є актуальною за змістом, самостійною, завершеною науковою працею, виконаною на належному науковому рівні. У ній розв'язано важливу науково-прикладну задачу розроблення нових методів та інформаційної технології онлайн-діагностування силових перетворювачів електроенергії, що має вагоме значення для розвитку галузі комп'ютерних наук та інформаційних технологій.

Робота містить науково обґрунтовані результати, які мають наукову новизну та підтверджені натурними експериментальними дослідженнями і практичним упровадженням. Оформлення дисертації та її зміст повністю відповідають

Робота містить науково обґрунтовані результати, які мають наукову новизну та підтверджені натурними експериментальними дослідженнями і практичним упровадженням. Оформлення дисертації та її зміст повністю відповідають вимогам чинного законодавства України, зокрема наказу Міністерства освіти і науки України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації» та «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44 (зі змінами).

Здобувач Байда Владислав Дмитрович повною мірою оволодів методологією наукових досліджень і заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 12 «Інформаційні технології» за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки».

Офіційний опонент:
доцент кафедри інженерії програмного
забезпечення та інформаційних
технологій
Дніпровського національного
університету
імені Олеся Гончара,
кандидат технічних наук, доцент _____ **С. В. АНТОНЕНКО**

Підпис кандидата технічних наук, доцента Антоненко С. В. засвідчую:

Проректор з наукової роботи
Дніпровського національного
університету
імені Олеся Гончара,
доктор біологічних наук, професор _____ **О. М. МАРЕНКОВ**

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ * Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара * 02066747 *