

Владислав Дмитрович Байда¹, Олександр Анатолійович Велігорський²

¹аспірант кафедри інформаційних та комп'ютерних систем
Національного університету «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: Vladyslav.Baida@stu.cn.ua, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-2172-8057>
Google Scholar: <https://scholar.google.com/citations?user=J8RjmHwAAAAJ>

²професор кафедри електроніки, автоматики, робототехніки та мехатроніки
Національного університету «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: o.veligorskiy@stu.cn.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8256-7339>
Google Scholar: <https://scholar.google.com.ua/citations?user=SWbfGzQAAAAJ>

РОЗРОБКА ТА ПРАКТИЧНА ІМПЛЕМЕНТАЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ДІАГНОСТИКИ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ НА ОСНОВІ ФІЗИЧНО-ОРІЄНТОВАНИХ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ

У статті представлено результати практичної імплементації методології діагностики апаратного забезпечення на основі технології цифрового двійника для перетворювачів постійного струму. За допомогою RuSpice розроблено модель понижуючого перетворювача, що враховує паразитні параметри компонентів. Сформовано таблицю відповідності впливу відхилень параметрів схеми на вихідні показники через моделювання шести ступенів відносних змін. Валідація на базі 6705 експериментальних вимірювань у системі дистанційної лабораторії на базі Lab Discovery Engine показала 100 % ефективність виявлення відмов та 85,1–100 % точність ідентифікації їхніх причин. Запропонований підхід забезпечує перехід від реактивного до проактивного обслуговування систем силової електроніки.

Ключові слова: цифровий двійник; інформаційна технологія; кіберфізична система; діагностика апаратного забезпечення; прогностичне обслуговування; силова електроніка; моделювання.

Рис.: 3. Табл.: 16. Бібл.: 32.

Актуальність теми дослідження. Надійність силової електроніки є критичним фактором у сучасних енергетичних системах, оскільки несподівані відмови DC-DC перетворювачів можуть призвести до значних економічних втрат та порушення функціонування критичних систем [1; 2]. Надійність цих імпульсних перетворювачів потужності безпосередньо впливає на доступність системи, безпеку та експлуатаційні витрати [3].

Незаплановані відмови обладнання коштують промисловості сотні мільярдів доларів щорічно. За даними дослідження [4] великих міжнародних промислових компаній, виробники з Fortune Global 500 у 2021-2022 роках втрачали близько \$1,5 трильйона щорічно через простой обладнання, що становило 11 % їхніх річних доходів. За два роки до того, у 2019-2020 загальні втрати були \$864 мільярди (або ж 8 % річних доходів), що вказує на тенденції до зростання. Це ж дослідження вказує, що ціна за втрачені через простой, сягає в середньому \$39 тисяч за годину, а для автомобільної сфери становить більш ніж \$2 мільйони за годину. Ці цифри демонструють масштаб економічних втрат, які можна суттєво знизити через впровадження ефективних діагностичних систем.

Раннє виявлення та діагностика несправностей дозволяє перейти від реактивного до проактивного обслуговування, значно знижуючи витрати на експлуатацію та підвищуючи загальну надійність систем [1; 5]. Останні досягнення в області технології цифрових двійників у поєднанні із сучасними методами діагностики створили нові можливості для моніторингу стану, виявлення несправностей та профілактичного технічного обслуговування апаратного забезпечення.

DC-DC перетворювачі, зокрема buck converter (понижуючий перетворювач), широко використовуються в живленні електронних пристроїв, електромобілях, фотоелектричних системах та системах накопичення енергії [6; 7]. Ці пристрої працюють в умовах значних електричних та теплових навантажень, що призводить до поступової деградації компонентів [5]. Основні та найбільш поширені типи несправностей включають в себе обриви та короткі замикання силових ключів (open-circuit та short-circuit faults), деградацію конденсаторів (зростання еквівалентного послідовного опору ESR та зменшення ємності),

збої датчиків струму та напруги, а також параметричні відхилення індуктивних елементів [8]. Дослідження [9] показує, що інвертори та перетворювачі становлять 27 % відмов у вітрових турбінах на суші, 28 % відмов у сонячних фотоелектричних системах та 12 % відмов в електромобілях.

Багато з сучасних підходів діагностики електронного обладнання мають суттєві обмеження. *Сигнальні методи діагностики*, хоч і забезпечують швидке виявлення несправностей (сотні наносекунд), страждають від складності налаштування та високої чутливості до завад [10]. *Модельно-орієнтовані* підходи демонструють кращу точність, але потребують детальних знань про систему [5] та складні системи не просто моделювати [11]. *Методи машинного навчання* досягають високої точності (95-99 %), проте вимагають великих обсягів навчальних даних та мають характер чорного ящика (black box), що обмежує їхнє застосування в критично важливих системах [12].

Технологія *цифрових двійників* (digital twins) є перспективною для діагностики апаратного забезпечення, що поєднує в собі переваги моделювання з можливостями аналізу даних у реальному часі. Систематичне дослідження 167 публікацій [13] показало, що застосування цифрових двійників для прогностичного обслуговування та управління станом (PHM) зросло експоненційно з 2018 року. При цьому 94 % досліджень використовують фізичні дані, а 34 % – віртуальні дані (сума більша за 100 %, тому що деякі дослідження використовували обидва типи даних).

Постановка проблеми. Діагностика апаратного забезпечення силової електроніки загалом, а також перетворювачів постійного струму зокрема, має декілька проблем.

По-перше, існуючі *сигнальні методи* діагностики мають суттєві обмеження щодо застосовності та надійності. Ці методи часто вимагають додаткових датчиків або діагностичних схем, що збільшує вартість впровадження. Крім того, алгоритми, розроблені для конкретних топологій конвертерів, важко або навіть неможливо екстраполювати на інші типи перетворювачів без повторного аналізу механізмів роботи та коригування моделі. Сигнальні методи також схильні до помилкових спрацювань при роботі в динамічних умовах зі значними частотами перемикання або коливаннями навантаження [14]. *Модельно-орієнтовані алгоритми* потребують детальних знань про систему та зазвичай базуються на рівняннях паритету, генерації нев'язок через оцінку параметрів або спостережачі стану, що ускладнює їх застосування при зміні конфігурації системи [14].

Для buck-перетворювачів проблема діагностики ускладнюється множинністю потенційних режимів відмов. Наприклад, дослідження [15] показує, що окрім відмов на рівні компонентів (MOSFET, діод, конденсатор тощо), відмови можуть відбуватися на рівні сенсорів (обрив, відхилення коефіцієнтів підсилення сенсорів, сильні завади). Вихідні конденсатори являються найбільш критичними компонентами з погляду надійності, а деградація їх ESR (еквівалентного послідовного опору) з часом та температурою може призвести до нестабільності вихідної напруги [16].

Особливо проблематичними є "м'які відмови" (soft faults) – поступова деградація параметрів компонентів, яка впливає на функціональність та надійність системи, але не призводить до миттєвого відключення. Автори підкреслюють, що на відміну від "жорстких відмов" (hard faults), які характеризуються раптовими структурними пошкодженнями (коротке замикання, обрив), м'які відмови являють собою поступову деградацію компонентів під впливом тривалої експлуатації та різноманітних факторів навколишнього середовища. Особливо важливим є спостереження дослідників, що з удосконаленням виробничих технологій електронні компоненти отримали значно довший термін служби, внаслідок чого м'які відмови стали домінуючим типом несправностей у системах. Це означає, що традиційні методи діагностики, орієнтовані на катастрофічні відмови, виявляються неефективними для сучасних високонадійних систем. Водночас втручання на

ранніх стадіях було б найбільш ефективним. Дослідження з використанням контрастного навчання для виявлення м'яких відмов у buck-перетворювачах показує, що деградація параметрів компонентів під впливом навколишнього середовища вимагає нових підходів. Основні механізми деградації ключових компонентів buck-boost перетворювачів це зменшення ємності та збільшення опору електролітичних конденсаторів, а також зменшення індуктивності та збільшення опору котушок індуктивності [17]. На відміну від таких повільних відмов, більшість існуючих підходів до діагностики в перетворювачах постійного струму зосереджені на раптових (катастрофічних) відмовах, зокрема коротких замиканнях (SCF) та обривах кола (OCF) у напівпровідникових ключах і діодах. Як показано у [14; 18], сучасні методи діагностики забезпечують майже стовідсоткову точність у виявленні таких жорстких збоїв, проте їхня ефективність істотно знижується у випадку поступових параметричних змін.

Робота [14] демонструє, що більшість алгоритмів побудовано навколо аналізу сигналів струму або напруги й забезпечують реакцію протягом одного-двох періодів комутації, що робить їх ефективними для швидких відмов, але непридатними для повільної деградації елементів, таких як зростання ESR конденсаторів чи дрейф значень індуктивності. Хоча в окремих роботах описано спроби моніторингу стану компонентів — наприклад, оцінювання ESR конденсатора за допомогою датчика Роговського або використання модельно-орієнтованих алгоритмів для оцінки параметрів у реальному часі, автори наголошують, що такі методи потребують значних обчислювальних ресурсів і поки що рідко застосовуються на практиці.

Проблема посилюється вимогами до діагностики у реальному часі з обмеженими обчислювальними ресурсами. Огляд методів виявлення несправностей у перетворювачах виявив, що сигнальні методології забезпечують швидку ідентифікацію несправностей, але з помітною складністю налаштування; модельно-орієнтовані методології дещо повільніші, але ефективніші з простішим налаштуванням, а методології на основі даних мають вищу точність, проте збільшену обчислювальну складність [10]. Для промислового застосування необхідний баланс між цими аспектами.

Дослідження Узагальнення Доменів (Domain Generalization) для діагностики апаратного забезпечення виявляють фундаментальну проблему: алгоритми діагностики несправностей на основі глибокого навчання сильно покладаються на припущення, що тренувальні та тестові дані є незалежними та однаково розподіленими (independent and identically distributed). Як зазначено у статті [19], алгоритми діагностики несправностей на основі глибокого навчання сильно покладаються на надспрощене припущення, що тренувальні (вихідний домен) та тестові (цільовий домен) дані є незалежними та однаково розподіленими. Коли це припущення порушується, вивчені діагностичні знання важко узагальнити на невидимі умови роботи обладнання. У реальних промислових сценаріях варіювання робочих умов, існування шумів у даних та відмови вимірювального обладнання неминуче впливають на розподіл даних. Коли алгоритм глибокого навчання стикається з даними поза розподілом вихідного домену, моделі часто зазнають значного погіршення продуктивності через “зсув домену”.

Також існує проблема генералізації методів діагностики. Більшість існуючих досліджень зосереджені на конкретних топологіях перетворювачів і специфічних режимах роботи. Навчена модель машинного навчання для buck converter з конкретними параметрами потужності часто демонструє значне зниження точності при застосуванні до інших конфігурацій. Тільки 2 з 11 досліджених методів верифіковано на різних потужностях та топологіях без необхідності повторного навчання. Цифрові двійники частково вирішують цю проблему через фізично обґрунтовану нормалізацію параметрів, але потребують початкового калібрування під кожну систему [18].

Критичною є також проблема інтерпретованості. У критично важливих застосуваннях «чорноскринькова» природа моделей глибокого навчання викликає занепокоєння щодо надійності, особливо коли модель не може надати міру невизначеності для своїх діагностичних рішень.

Огляд викликів модельно-орієнтованої діагностики [20] виявляє, що попри 40+ років використання, ця область продовжує стикатися з численними науковими викликами: обробка складних систем, управління невизначеністю, обчислювальна здатність для великомасштабних кіберфізичних систем та вимоги до діагностики у реальному часі.

Таким чином, основна проблема полягає у необхідності створення інтегрованої методології діагностики, яка б:

- 1) Забезпечувала високу точність виявлення різноманітних типів несправностей;
- 2) Функціонувала у реальному часі з обмеженими обчислювальними ресурсами;
- 3) Адаптувалася до зміни параметрів та умов експлуатації;
- 4) Була достатньо узагальненою для застосування до різних конфігурацій busk-перетворювачів і не тільки;
- 5) забезпечувала інтерпретованість діагностичних рішень для критично важливих застосувань.

Аналіз останніх досліджень і публікацій показує, що останнє десятиліття характеризується інтенсивним розвитком трьох взаємопов'язаних напрямків досліджень: технології цифрових двійників, методів діагностики силової електроніки та специфічних підходів до моніторингу перетворювачів постійного струму. Розглянемо ключові досягнення в цих областях.

Цифрові двійники для діагностики та моніторингу. Деякі фундаментальні роботи із систематизації застосувань цифрових двійників для моніторингу несправностей були опубліковані протягом 2023-2024 років. У роботі [21] представлено всебічний огляд технології цифрових двійників для моніторингу несправностей. Там показано, що цифровий двійник вирішує обмеження традиційних методів у відображенні складних взаємодій системи. Важливість цього напрямку підтверджує систематичний огляд 167 публікацій про цифрові двійники для прогностичного обслуговування [13], який виявив, що застосування розподілені наступним чином:

- виробництво 48 %;
- енергетика 30 %;
- інші галузі 22 %.

при чому домінуючим аспектом є виявлення несправностей.

Розвиток цифрових двійників у силовій електроніці систематизовано в оглядовій статті [22], яка аналізує понад 170 публікацій і визначає три ключові фази життєвого циклу застосування цифрових двійників: проєктування, управління та обслуговування. Цей огляд виявляє критичні виклики: суперечності між складністю та точністю моделі, необхідність точного відображення та безперервної взаємодії даних, проблеми масштабованості для таких архітектур.

Цифрові двійники для перетворювачів постійного струму. Пряме застосування цифрових двійників до перетворювачів постійного струму демонструють кілька робіт. Автори статті [7] розробили цифровий двійник для моніторингу та управління busk-перетворювачем, проте автори відкрито зазначають, що «діагностика стану системи та прогнозування» залишаються майбутньою роботою.

У статті [23] запропонували метод оцінки показників стану здоров'я перетворювачів постійного струму на основі цифрового двійника, який використовує оптимізацію роєм частинок (PSO) для ідентифікації параметрів схеми. Метод призначений для неінвазив-

ного моніторингу деградації ключових компонентів (конденсатора та MOSFET) без додаткових апаратних схем та вимог до калібрування. Цифровий двійник включає модель силової частини, схеми вимірювання та замкнутого контуру управління для точного відтворення поведінки реального перетворювача.

Ймовірнісні цифрові двійники в реальному часі. Цей підхід для діагностики апаратного забезпечення було представлено в роботі [24], де автори використали поліноміальне розкладання хаосу та побудовані на FPGA розв'язувачі математичних рівнянь моделі для моніторингу, при цьому система порівнює ймовірнісний цифровий двійник з фізичним для виявлення аномальної роботи.

Методи виявлення несправностей у силовій електроніці. Загальні огляди методів виявлення несправностей у силовій електроніці надають систематичний аналіз існуючих підходів. У роботі [14] представлено огляд діагностики та відмовостійкості для DC-DC перетворювачів з класифікацією методів на сигнальні, модельно-орієнтовані та тих, що базуються на штучному інтелекті. Огляд у [10] проаналізував понад 150 статей останнього десятиліття і встановив, що сигнальні методології забезпечують швидку ідентифікацію, модельно-орієнтовані – ефективне налаштування, а методології на основі даних – найвищу точність при збільшеній обчислювальній складності.

Огляд методів діагностики у трифазних інверторах [9] надає детальну класифікацію типів несправностей та методів виявлення. Для сигнальних методів час виявлення варіюється від 4 мс (перетворення Кларка) до 20 мс (спектрограма); для модельно-орієнтованих – від 0,91 мс (MRAS) до 4,96 мс (метод ковзного вікна); для методів на основі ШІ – від менш як 20 мс (нечітка логіка) до 46 мс (ШНМ). Розширений фільтр Калмана (ЕКФ) виділяється як такий, що забезпечує чудові результати, швидке виявлення та адаптацію до змін системи.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Огляди виявляють відсутність стандартизованих архітектур цифрових двійників для силової електроніки [22] та розрив між доступними визначеннями цифрових двійників та вимогами для майбутніх енергетичних систем [25]. Бракує стандартизованих наборів даних для валідації діагностичних підходів та єдиних метрик продуктивності, які б дозволяли об'єктивне порівняння різних методологій.

Необхідною є уніфікація форматів даних, створення стандартизованих інтерфейсів для обміну інформацією між фізичним пристроєм та його віртуальним відображенням, а також розв'язання питань забезпечення кібербезпеки при такому двосторонньому обміні даними [26; 27].

Також створення цифрового двійника для складних електронних систем стикається з фундаментальною проблемою забезпечення оптимального балансу між точністю моделювання та швидкістю обчислень. Детальні мультифізичні моделі, що враховують електричні, теплові, механічні процеси та їх взаємний вплив, а також процеси старіння матеріалів, вимагають значних обчислювальних ресурсів і складно реалізуються у реальному часі, тоді як спрощені моделі працюють швидше, але з меншою точністю [28].

У той самий час, відкритим залишається питання точного визначення критеріїв відмови та оцінки залишкового ресурсу (Remaining Useful Life, RUL) у межах функціонування цифрового двійника. Щоб цифровий двійник не лише виявляв дефекти на ранній стадії, але й передбачав момент відмови з достатньою точністю, необхідно встановити граничні значення параметрів, при досягненні яких слід вживати превентивних заходів [29].

Таким чином, для успішного впровадження технології цифрових двійників у сферу діагностики та прогностичного обслуговування апаратного забезпечення необхідні подальші дослідження в напрямках стандартизації, створення гібридних моделей оптимальної складності, розробки методів прогнозування за умов множинних механізмів деградації, та адаптації рішень для виконання на обмежених у ресурсах обчислювальних платформах.

Метою статті є впровадження на практиці методології діагностики апаратного забезпечення з використанням інформаційної технології цифрового двійника, описаної в роботі [30]. Ця методологія буде впроваджена в існуючій системі дистанційних лабораторій з вивчення перетворювачів постійного струму на прикладі buck та boost перетворювачів, що була розроблена в рамках проекту Lab Discovery Engine (міжнародний суб-грант проекту NGI Search від програми Horizon Europe HORIZON-CL4-2021-HUMAN-01).

Виклад основного матеріалу. Сформувані таблицю відповідності \bar{E} до \bar{R} можна декількома шляхами:

1. Експертним методом;
2. Експериментальним методом;
3. Методом математичного моделювання.

Експертний метод базується на тому, що поведінка типових схем (таких, як понижуючий перетворювач напруги) є добре дослідженою і передбачуваною. Тому людина, яка є експертом в області силових електроніки, може передбачити вплив змін вхідних значень на зміну вихідних, таким чином створивши таблицю відповідності власноруч. Такий підхід є швидким у використанні, не вимагає додаткового обладнання чи навичок програмування, але підвержений людському 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 апаратного забезпечення з паразитними елементами й нелінійностями, для більш складних схем обмежується поточним станом знань у відповідній сфері, а також цей підхід неможливо автоматизувати.

Експериментальний метод має на увазі почергову зміну вхідних значень на реальному пристрої з вимірюванням фактичних змін вихідних значень. Даний метод враховує всі властивості реального апаратного забезпечення, 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, але він вимагає багато часу і ресурсів, обмежених 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 підвержений помилкам у випадку дефектів конкретного електронного пристрою, який використовується для експериментів, має високий ризик пошкодження пристрою, складно автоматизується і відтворюється.

Метод математичного моделювання полягає у побудові математичної моделі електронного пристрою за допомогою програмних засобів. Такий метод 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, але вимагає точної моделі, ігнорує частину реальних паразитних параметрів, вимагає спеціалізованого ПЗ і вміння роботи з ним, а також модель все рівно має бути підтвердженою шляхом порівняння поведінки з реальним екземпляром пристрою.

Для цієї статті було обрано метод математичного моделювання через відносно простоту схеми (а отже і простоту створення достатньо точної математичної моделі), 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 математична модель слугує для двох цілей одночасно: створення таблиці відповідності та отримання вектора \bar{Y}_2 у процесі використання системи, що реалізує дану методологію.

Отже, постає необхідність у створенні такої математичної моделі, що буде легко інтегруватися в програмне забезпечення. Як технологія було обрано PySpice, яка являє собою бібліотеку мовою Python, яка реалізує інтерфейс до симуляторів електричних кіл Ngspice та Хусе на вибір. У нашій моделі використовується Ngspice.

Перетворювач постійного струму, що знижує напругу, який аналізувався в даній роботі, показано на рис. 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 апаратного забезпечення. 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.

Як описано в роботі [31], 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).

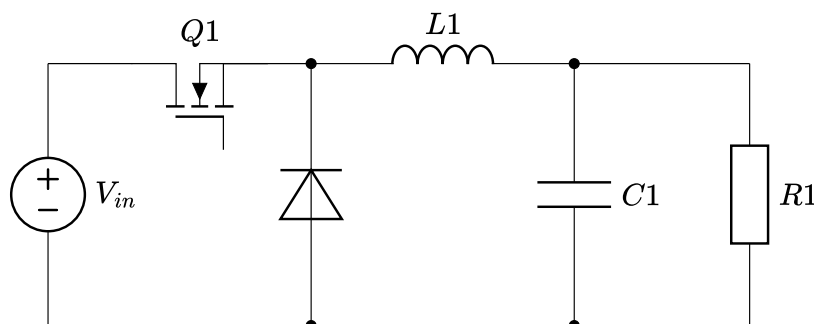


Рис. 1. Типова схема понижуючого перетворювача напруги

Джерело: розроблено авторами.

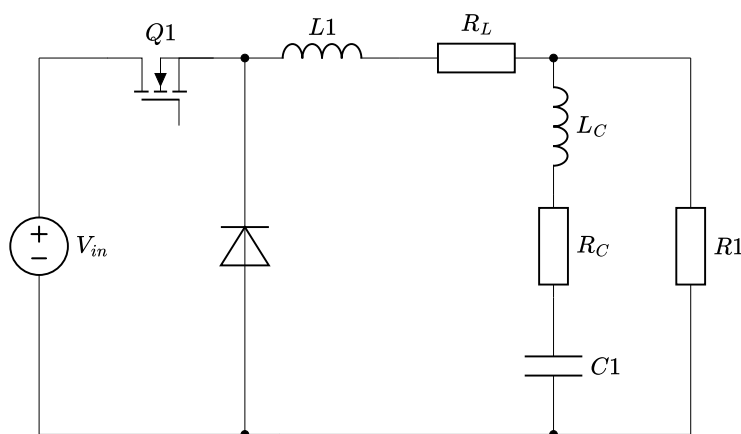


Рис. 2. Розширена схема електрична принципова перетворювача з деякими паразитними елементами

Джерело: розроблено авторами.

На рис. 2 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_{DSon} .

Для дослідження поведінки реального перетворювача було зроблено тривалий у часі збір даних через цифровий осцилограф, підключений до виходу перетворювача, а також до схеми вимірювання, що дозволяє перерахувати отриману напругу в струм індуктивності. Приблизно кожні дві секунди протягом більш ніж 4 години, робилися вимірювання цифровим осцилографом. Результатом є набір сигналів: напруги на ємності і струму через індуктивність у вказані моменти часу. Загалом було отримано 6705 таких вимірювань. У кожен з моментів вимірювання на входи перетворювача були подані одні й ті самі значення, а саме:

1. Вхідна напруга 12 В.
2. коефіцієнт заповнення 50 %.
3. Ємність конденсатора 44 мкФ.
4. Опір навантаження 3,8 Ом.

На основі цих даних можна робити аналіз поведінки схеми, такі як: середні значення напруги та струму, пульсації напруги та струму, а також статистику щодо діапазонів цих значень, наприклад значення найбільшої і найменшої пульсації напруги. Результати цього аналізу можуть слугувати для калібрування математичної (програмної) моделі, а також визначення параметра θ для реалізації методології. Статистичні дані щодо вибірки сигналів наявні в роботі [31].

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 зумовлено високим рівнем шумів та зазначеними вище проблемами зі схемою вимірювання. Такі умови є чудовими для тестування описаної в [30] методології, оскільки дозволяють перевірити коректність її роботи на неточному обладнанні. Оскільки методологія працює з пороговим значенням θ , яке саме по собі є відносною величиною, то зниження співвідношення розбіжностей максимального і максимального значення показників є важливим для забезпечення більшої точності і надійності роботи алгоритму.

У табл. 8 роботи [31] наведено максимальні відхилення чотирьох показників у відсотках, які використані в таблиці 1 як «базове значення θ ». Очевидно, що наявний набір вимірюваних сигналів не надає гарантії, що він містить найбільш великі або низькі можливі значення кожного з чотирьох показників, то доцільно закласти запас для значень θ . Як запас було вирішено додати 20 % до кожного зі значень θ , а отже результуючі θ мають значення, наведені в табл. 8.

Таблиця 1 – Отримані значення θ та значення з запасом

Показник	Базове значення θ	Значення θ з запасом (базове * 1.2)
Середня напруга	4,45	5,34
Пульсація напруги	41,69	50,03
Середній струм	11,63	13,96
Пульсація струму	42,25	50,7

Джерело: розроблено авторами.

Створення таблиць відповідності методології. Всі характеристики компонентів схеми перетворювача, включаючи паразитні, являються вхідними значеннями схеми з погляду методології. Деякі з характеристик закладаються на етапі проектування і не є змінними під час експлуатації пристрою. А деякі з них, наприклад коефіцієнт заповнення

сигналу ШІМ, легко піддаються зміні. У цій 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 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 амплітуду пульсацій, як і збільшення D з 0,3 до 0,4).

В даному прикладі 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 таблиці відповідності виглядає наступним чином: створюється базова модель зі значеннями, вказаними в таблиці 2. 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 3. 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 3 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. У цьому прикладі використовується загальне порогове значення $\theta = 0,06$, що означає, що зміна вихідного значення на менш, ніж 6 %, буде проігнорована і відповідний r_i прийме значення «0». Вибір порогового значення $\theta = 0,06$ для формування таблиці відповідності обумовлений необхідністю забезпечення високої дискримінативної здатності діагностичної моделі. На відміну від етапу детектування відмов на реальному обладнанні, де високий рівень шумів вимагає значних значень θ , етап математичного моделювання дозволяє зафіксувати первинні фізичні залежності. Значення 6 % відповідає нижній межі розбіжностей параметрів компонентів, описаній у фаховій літературі [32], що дозволяє ідентифікувати навіть слабкі кореляції між паразитними параметрами та вихідними характеристиками сигналів, уникаючи надмірної фільтрації корисних зв'язків у векторі \bar{R} . Водночас, правильний вибір θ для етапу формування таблички відповідності залишається відкритим питанням і потребує подальшого дослідження, оскільки гіпотетично його зміна може позитивно вплинути на результативність методології.

Таблиця 2 – Значення параметрів моделі для побудови таблиці відповідності

Параметр	Значення для симуляції
Час наростання струму затвора транзистора, t_{Gr}	0.1007 нс
Час спаду струму затвора 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

Джерело: розроблено авторами.

У табл. 3, яка містить коефіцієнти для кожного зі ступенів зміни відповідного параметра, значення «0» як відносна зміна «---» 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 continuous conduction режиму роботи моделі, моделювання триває 5000 періодів, після чого аналізується лише останній період.

Таблиця 3 – Множники, що відповідають відносним змінам кожного з параметрів перетворювача

---	--	-	+	++	+++
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	1/1.25	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}

Джерело: розроблено авторами.

На рис. 3 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 $\theta = 0.06$, як пояснено вище), 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 «-».

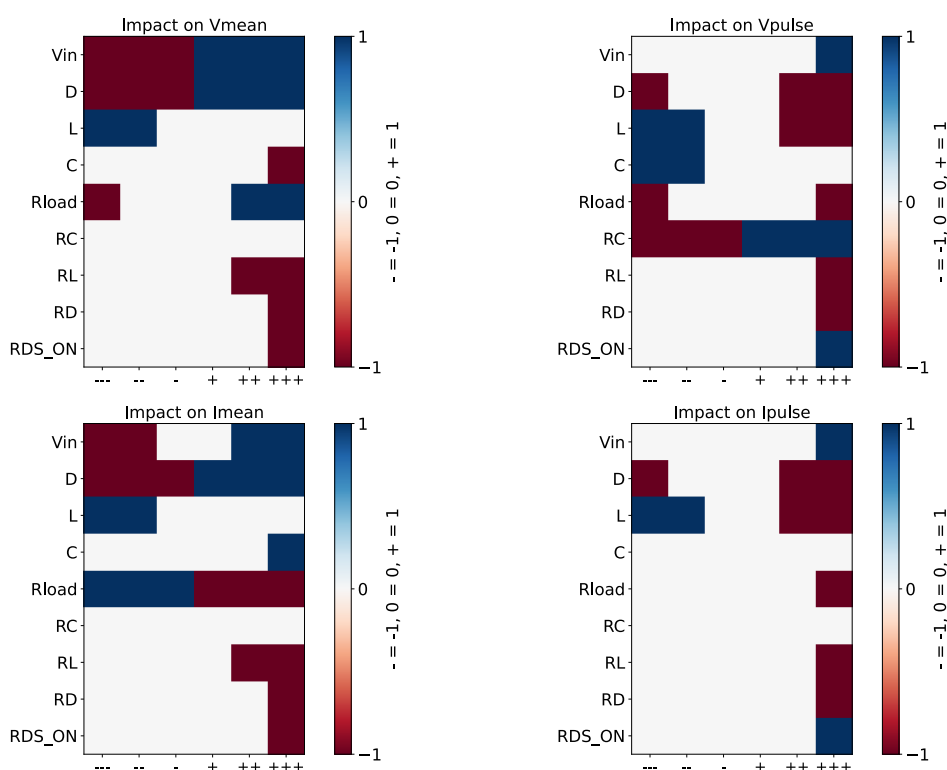


Рис. 3. Теплові карти впливів змін вхідних значень на вихідні
Джерело: розроблено авторами.

У результаті отримано таблицку відповідності, що зображена в табл. 4.

Таблиця 4 – 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},{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},{+++},{0},{0},{0},{0}]
[+,0,-,0]	[{0},{0},{0},{0},{+},{0},{0},{0},{0}]
[-,-,+,-]	[{0},{0},{0},{0},{-,-},{0},{0},{0},{0}]

Джерело: розроблено авторами.

Тестування. Задля перевірки правильності функціонування даної імплементації методології було поставлено описані нижче тести. Кожен з тестів виконувався шляхом цілеспрямованого контрольованого встановлення неправильних значень на схемі задля симуляції певних проблем з апаратним забезпеченням або схемою керування транзистором. Задля того, аби знизити рівень 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. 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 цифрового двійника. Далі ці найбільші та найменші відхилення порівнюються з пороговими значеннями, зазначеними в таблиці 1 і робиться висновок про напрямок відносної зміни: “-”, “0” або “+”, з усіх чотирьох показників формується вектор \bar{R} . Отриманий таким чином вектор \bar{R} шукають у 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.

Під розширеним пошуком в таблиці відповідності мається на увазі описаний в статті [30] підхід, коли будь-який компонент вектора \bar{R} зі значенням «0» може сприйматися як «+» або «-».

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. 40 замість 50:

Даний тест був виконаний над набором даних, що складається з 1991 вимірювання. Наступна таблиця містить статистичні дані цього тесту:

Таблиця 5 – Результати тесту відхилення коефіцієнту заповнення 40 замість 50

Показник	Максимальне відхилення, %	Мінімальне відхилення, %	Відсоток значень, менших за θ по модулю, %	Напрямок відносної зміни (-/+/0)
Середня напруга	-16,12	-16,35	0	-
Пульсації напруги	29,19	-37,49	100	0
Середній струм	-16,59	-26,04	0	-
Пульсації струму	49,54	-41,64	100	0

Джерело: розроблено авторами

Отже, усі з 1991 вимірювання мають вектор \bar{R} зі значенням «-0-0», що по таблиці відповідності вказує на вектор \bar{E} , що містить відносну зміну “--” параметра. Отже, в даному тесті алгоритм показав 100% коректність роботи при зміні коефіцієнту заповнення в $40/50 \cdot 100 = 20\%$.

2. 45 замість 50:

Відповідна таблиця статистичних даних:

Таблиця 6 – Результати тесту відхилення коефіцієнта заповнення 45 замість 50

Показник	Максимальне відхилення, %	Мінімальне відхилення, %	Відсоток значень, менших за θ по модулю, %	Напрямок відносної зміни (-/+/0)
Середня напруга	-6.57	-6.81	0	-
Пульсації напруги	33.36	-37.49	100	0
Середній струм	-7.67	-16.38	85.1	-/0
Пульсації струму	27.66	-41.64	100	0

Джерело: розроблено авторами.

З результатів цього тесту на 1124 вимірюваннях видно, що у 85.1% випадків вектор \bar{R} має значення «-0-0» (що і очікується), але в інших 14,9 % випадках $\bar{R} = \ll-000\gg$, відповідний до якого вектор \bar{E} не містить коректної причини відхилення в даному випадку. Отже, при зміні коефіцієнту заповнення в $45/50 \cdot 100 = 10\%$ коректність роботи алгоритму склала 100 % у плані детектування неправильності роботи, але 85,1 % в плані правильного визначення причини такої роботи. Як можна бачити з таблиці, дана неточність викликана тільки показником струму, що пояснюється неточністю роботи самого апаратного забезпечення, що тестується, через проблеми в схемі вимірювання струму. При використанні підходу з розширенням можливих причин відмови, що описана в [30], причина даної некоректної поведінки може бути встановлена правильно, хоча це й збільшить кількість потенційних причин.

3. 1 замість 50:

Таблиця 7 – Результати тесту відхилення коефіцієнту заповнення 1 замість 50

Показник	Максимальне відхилення, %	Мінімальне відхилення, %	Відсоток значень, менших за θ по модулю, %	Напрямок відносної зміни (-/+/0)
Середня напруга	-96.87	-97.23	0	-
Пульсації напруги	38.57	-62.53	91.9	-/0
Середній струм	-97.40	-98.29	0	-
Пульсації струму	16.06	-47.28	100	0

Джерело: розроблено авторами.

Для даного тесту було зібрано 8600 вимірювань. З результатів видно, що в усіх 100% вимірюваннях алгоритмом було помічено некоректну поведінку, але в 8.1% випадків вектор \bar{R} мав значення «---0» (на відміну від інших 91.9% випадків з «-0-0»), який не має відповідного рядку в таблиці відповідності, а отже для правильного визначення причини відмови потрібно було б використати підхід з розширеним пошуком в таблиці, як згадувалося вище. Така поведінка пов'язана з досить низькими значеннями пульсацій напруги, особливо при низьких значеннях середньої напруги, як, власне, і відбувалося в тесті, оскільки коефіцієнту заповнення було виставлено на рівні 1/100. При таких низьких пульсаціях зовнішні шуми мають більш вагомий вплив на розрахунки.

4. 60 замість 50

Таблиця 8 – Результати тесту відхилення коефіцієнту заповнення 60 замість 50

Показник	Максимальне відхилення, %	Мінімальне відхилення, %	Відсоток значень, менших за θ по модулю, %	Напрямок відносної зміни (-/+/0)
Середня напруга	25.61	24.18	0	+
Пульсації напруги	45.78	-41.69	100	0
Середній струм	23.12	12.96	0.3	+/0
Пульсації струму	31.30	-45.29	100	0

Джерело: розроблено авторами.

Даний тест був виконаний на 1454 вимірюванні. Він показує поведінку алгоритму при збільшенні коефіцієнту заповнення. З нього видно, що, аналогічно до попередніх тестів, у всіх 100 % випадків було задетектовано відхилення в поведінці пристрою. У 99,7 % причина була визначена правильно, а в інших 0,3 % вектор \bar{R} мав значення «+000», що, відповідно до таблиці відповідності без використання розширеного пошуку, помилково вказало би не на невелике збільшення коефіцієнту заповнення ШІМ, а на невелике збільшення вхідної напруги.

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 9 – Результати тесту відхилення вхідної напруги 10 В замість 12 В

Показник	Максимальне відхилення, %	Мінімальне відхилення, %	Відсоток значень, менших за θ по модулю, %	Напрямок відносної зміни (-/+/0)
Середня напруга	-13.17	-14.43	0	-
Пульсації напруги	25.02	-37.49	100	0
Середній струм	-10.34	-26.36	0.4	-/0
Пульсації струму	13.07	-56.23	99.9	0/-

Джерело: розроблено авторами.

Даний тест виконаний на 3119 вимірюваннях. У 99.5% випадків вектор \bar{R} має значення «-0-0», що, через таблицю відповідності, вказує на правильну причину некоректності поведінки. У 0,4 % випадків вектор приймає значення «-000», що також вказує на зниження вхідної напруги, що є правильною причиною. В інших 0,1 % випадків (2 вимірювання з 3119) вектор приймає значення «-0--», яке не міститься в таблиці відповідності безпосередньо. В усіх 100 % випадках факт наявності несправності був помічений.

2. 6 В замість 12 В:

Таблиця 10 – Результати тесту відхилення вхідної напруги 6 В замість 12 В

Показник	Максимальне відхилення, %	Мінімальне відхилення, %	Відсоток значень, менших за θ по модулю, %	Напрямок відносної зміни (-/+/0)
Середня напруга	-48.77	-49.17	0	-
Пульсації напруги	16.57	-41.72	100	0
Середній струм	-44.99	-59.98	0.4	-
Пульсації струму	2.12	-70.82	53.2	0/-

Джерело: розроблено авторами.

За результатами цього тесту на 1013 вимірювання в порівнянні з попереднім видно, що при зниженні напруги на вході, алгоритм починає гірше детектувати причину відмови. Так, у цьому тесті у 53.2% випадків вектор \bar{R} мав значення «-0-0», що правильно вказує на зниження вхідної напруги. Проте в решті 46,8 % випадків вектор приймав значення «-0--», що не має прямого відображення в таблиці відповідності. Такий результат пов'язаний з природою поведінки пульсацій струму в пристрої. Оскільки при зниженні вхідної напруги знижуються і значення струму через індуктивність, то шуми і паразитні пульсації через проблеми в обладнанні стають більш помітними і суттєво впливають на вимірювання пульсацій струму.

3. 14 В замість 12 В:

Таблиця 11 – Результати тесту відхилення вхідної напруги 14 В замість 12 В

Показник	Максимальне відхилення, %	Мінімальне відхилення, %	Відсоток значень, менших за θ по модулю, %	Напрямок відносної зміни (-/+/0)
Середня напруга	22,23	21,01	0	+
Пульсації напруги	75,03	-33,32	99,9	0/+
Середній струм	19,01	9,52	46,4	+/0
Пульсації струму	38,60	-30,70	100	0

Джерело: розроблено авторами.

В даному тесті на 1632 вимірювання у 53.6% випадків вектор \bar{R} мав значення «+0+0», а в 46,3 % «+000», обоє з яких правильно визначають причину відмови – вхідна напруга вища за очікувану. Лише в одному випадку з «1632» (менш, ніж 0,1 %) вектор \bar{R} мав значення «++00», що не міститься в таблиці відповідності.

4. 18 В замість 12 В:

Таблиця 12 – Результати тесту відхилення вхідної напруги 18 В замість 12 В

Показник	Максимальне відхилення, %	Мінімальне відхилення, %	Відсоток значень, менших за θ по модулю, %	Напрямок відносної зміни (-/+/0)
Середня напруга	57.15	56.80	0	+
Пульсації напруги	79.11	-37.52	99.3	0/+
Середній струм	54.51	43.43	0	+
Пульсації струму	64.13	-12.47	97.7	0/+

Джерело: розроблено авторами.

Цей тест був виконаний на 1828 вимірюваннях. У 97% випадків вектор \bar{R} приймав значення «+0+0», що повністю коректно визначає причину відхилення у поведінці пристрою. У 2,3 % випадків \bar{R} мав значення «+0++», а в 0,7 % – «+++0», обидва з яких не мають свого рядка в таблиці відповідності, але перший із них показав би коректну причину при умові використання розширеного пошуку.

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 13 – Результати тесту відхилення опору навантаження 2 Ом замість 4 Ом

Показник	Максимальне відхилення, %	Мінімальне відхилення, %	Відсоток значень, менших за θ по модулю, %	Напрямок відносної зміни (-/+/0)
Середня напруга	1.83	0.66	100	0
Пульсації напруги	37.38	-33.39	100	0
Середній струм	102.27	91.23	0	+
Пульсації струму	34.95	-38.00	100	0

Джерело: розроблено авторами.

У цьому тесті на 2256 вимірювання в усіх 100% випадків вектор \bar{R} мав значення «00+0», що повністю правильно визначає причину некоректної поведінки.

2. 19 Ом замість 4 Ом:

Таблиця 14 – Результати тесту відхилення вхідної напруги 19 Ом замість 4 Ом

Показник	Максимальне відхилення, %	Мінімальне відхилення, %	Відсоток значень, менших за θ по модулю, %	Напрямок відносної зміни (-/+/0)
Середня напруга	7.49	6.19	0	+
Пульсації напруги	12.40	-41.72	100	0
Середній струм	-77.63	-86.83	0	-
Пульсації струму	20.36	-41.65	100	0

Джерело: розроблено авторами.

З результатів даного тесту на 694 вимірювання видно, що в усіх 100% вектор \bar{R} приймав значення «+0-0», що свідчить про правильну роботу алгоритма та коректне визначення причини відмови.

2. 5 Ом замість 4 Ом:

Таблиця 15 – Результати тесту відхилення вхідної напруги 5 Ом замість 4 Ом

Показник	Максимальне відхилення, %	Мінімальне відхилення, %	Відсоток значень, менших за θ по модулю, %	Напрямок відносної зміни (-/+/0)
Середня напруга	4.4	4.26	100	0
Пульсації напруги	45.71	-41.72	100	0
Середній струм	-19.45	-29.89	0	-
Пульсації струму	24.00	-38.00	100	0

Джерело: розроблено авторами.

У цьому тесті було використано 1066 вимірювань. В усіх 100 % вектор \bar{R} мав значення «00-0», що, згідно таблиць відповідності, правильно визначає причину відмови.

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 1040 вимірюваннях. Результати тесту наведені в табл. 16.

Таблиця 16 – Результати тесту без відхилень

Показник	Максимальне відхилення, %	Мінімальне відхилення, %	Відсоток значень, менших за θ по модулю, %	Напрямок відносної зміни (-/+/0)
Середня напруга	3.81	3.21	100	0
Пульсації напруги	28.99	-37.59	100	0
Середній струм	3.19	-6.72	100	0
Пульсації струму	27.65	-41.65	100	0

Джерело: розроблено авторами.

Як видно з результатів, в усіх 100 % вимірюваннях алгоритм спрацював правильно і не було жодного хибного спрацювання.

У процесі тестування було помічено, що для збільшення точності методології бажано використовувати більшу кількість відносних змін, що, в свою чергу, має знизити кількість «пробілів» – векторів \bar{R} , для яких нема прямого відповідного вектора \bar{E} в таблиці.

Аналіз факторів, що впливають на точність ідентифікації

Незважаючи на високу ефективність виявлення факту відхилень (100 % у проведених тестах), точність ідентифікації конкретних причин несправностей у межах 85–100 % обумовлена не обмеженнями самої методології, а метрологічними характеристиками використаного експериментального стенда. Оскільки запропонований підхід є інваріантним до типу апаратного забезпечення та базується на універсальних математичних моделях, достовірність діагностичних рішень безпосередньо корелює з якістю вхідних даних.

Проведений аналіз виявив наступні фактори, що вносять додаткову невизначеність:

Артефакти вимірювань. Сигнали струму в експериментальному макеті мають помітні спотворення («спайки») у моменти комутації, природа яких пов'язана з особливостями побудови конкретної схеми вимірювання. Ці апаратні шуми ускладнюють розрахунок реальних пульсацій, що може призводити до формування некоректних діагностичних векторів у граничних випадках.

Динамічна нестабільність параметрів. В існуючій реалізації перетворювача спостерігаються флуктуації опору навантаження, оскільки пристрій задизайнений із пріоритетом регулювання вихідного струму, а не підтримки стабільного опору. Це призводить до розбіжностей між статичними параметрами моделі та реальними значеннями у момент вимірювання.

Вимоги до точності даних. Застосування фільтра ковзного середнього дозволило компенсувати частину завад і знизити абсолютну різницю пульсацій у 2,83 раза [31]. Однак для повної нівеляції зсуву та забезпечення ідеальної точності ідентифікації доцільним є використання більш точного вимірювального обладнання з вищою роздільною здатністю та меншим рівнем власних шумів, що є стандартною вимогою для промислових систем діагностики.

Чутливість до шумів при низьких амплітудах. У режимах з низьким коефіцієнтом заповнення або зниженою вхідною напругою, корисний сигнал пульсацій стає сумірним із рівнем зовнішніх завад. У таких умовах вплив неідеальності вимірювальної схеми стає критичним, що підтверджується результатами тестів, де точність ідентифікації причини дещо знижувалася при значних відхиленнях від номінального режиму.

Таким чином, підвищення достовірності діагностики вбачається у використанні професійних інструментальних засобів збору даних, що дозволить повністю реалізувати аналітичний потенціал розробленої методології.

Висновки. Практична імплементація методології діагностики апаратного забезпечення на основі цифрового двійника для понижуючого перетворювача постійного струму продемонструвала високу ефективність підходу. Застосування PySpice з Ngspice для створення математичної моделі з урахуванням семи паразитних параметрів (опір котушки, ESR конденсатора, паразитна індуктивність конденсатора, опір діода, опір відкритого транзистора) на основі 6705 експериментальних вимірювань дозволило створити точний цифровий двійник реального обладнання. Тестування на серії наборів сигналів показала 100 % виявлення факту відмови в усіх сценаріях, з коректним визначенням причини у 85.1-100 % випадків залежно від ступеня відхилення параметрів.

Розроблений підхід до формування таблиці відповідності через моделювання шести ступенів відносних змін («+», «++», «+++», «-», «--», «---») для кожного вхідного параметра та використання порогового значення $\theta = 0.06$ забезпечує надійну діагностику навіть при роботі з неточним обладнанням. Тестування на реальному обладнанні з високим рівнем шумів (співвідношення мінімальних і максимальних значень пульсацій понад 100%) підтвердило стійкість методології до неідеальних умов експлуатації.

Дана стаття логічно продовжує роботу, в якій було описано методологію діагностики, а також користується результатами роботи щодо ідентифікації паразитних параметрів перетворювача постійного струму за допомогою генетичного алгоритму. Водночас правильний вибір θ для етапу формування таблиці відповідності залишається відкритим питанням і потребує подальшого дослідження, оскільки гіпотетично його зміна може позитивно вплинути на результативність методології.

Результати дослідження заповнюють прогалину у практичному застосуванні цифрових двійників для діагностики силової електроніки в режимі реального часу, забезпечуючи баланс між точністю моделювання та обчислювальною ефективністю. Розроблена методологія здатна виявляти як жорсткі, так і м'які відмови через систематичний аналіз чотирьох ключових показників (середня напруга, пульсації напруги, середній струм, пульсації струму). Застосування методу математичного моделювання замість експериментального підходу дозволяє швидко адаптуватися до інших топологій перетворювачів та конфігурацій без ризику пошкодження фізичного обладнання.

Впровадження описаної методології в систему дистанційних лабораторій, що були розроблені в рамках проєкту LabDiscoveryEngine для вивчення перетворювачів постійного струму, має потенціал знизити кількість та загальний час простоїв електронного обладнання через забезпечення можливості раннього виявлення деградації компонентів та перехід від реактивного до проактивного технічного обслуговування.

Подальший розвиток і масштабування подібних систем може призвести до значного зниження експлуатаційних витрат у критичних системах, що використовують пристрої силової електроніки.

Список використаних джерел

1. Wang, L., Zhu, F., Jiang, F., & Yang, Y. (2025). Power converter fault detection using MLCA–SpikingShuffleNet. *World Electric Vehicle Journal*, 16(1), 36. <https://doi.org/10.3390/wevj16010036>
2. Saravanan, B., D, P., & Vengateson, A. (2025). *Benchmarking traditional machine learning and deep learning models for fault detection in power transformers*. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2505.06295>.
3. Ferreira Costa, L., & Liserre, M. (2018). Failure analysis of the dc-dc converter: A comprehensive survey of faults and solutions for improving reliability. *IEEE Power Electronics Magazine*, 5(4), 42–51. <https://doi.org/10.1109/MPEL.2018.2874345>.
4. Siemens. (2022). *The true cost of downtime 2022*. [White Paper/Report].
5. Yang, S., Xiang, D., Bryant, A. T., Mawby, P., Ran, L., & Tavner, P. J. (2010). Condition monitoring for device reliability in power electronic converters: A review. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 25(11), 2734–2752. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2010.2049377>.
6. Jain, P., Poon, J., Singh, J. P., Spanos, C., Sanders, S., & Panda, S. (2019). A digital twin approach for fault diagnosis in distributed photovoltaic system. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 35(1), 1–1. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2019.2911594>.
7. Lei, Z., Zhou, H., Dai, X., Hu, W., & Liu, G. P. (2023). Digital twin based monitoring and control for DC-DC converters. *Nature Communications*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-023-41248-z>.
8. Jia, Z., Liu, Z., Vong, C. M., Wang, S., & Cai, Y. (2023). DC-DC Buck circuit fault diagnosis with insufficient state data based on deep model and transfer strategy. *Expert Systems with Applications*, 213(Part A), 118918. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.118918>.
9. Ajra, Y., Hoblos, G., Al Sheikh, H., & Moubayed, N. (2024). A literature review of fault detection and diagnostic methods in three-phase voltage-source inverters. *Machines*, 12(9), 631. <https://doi.org/10.3390/machines12090631>.
10. Aviña-Corral, V., Rangel-Magdaleno, J. J., Barron-Zambrano, J. H., & Rosales-Nuñez, S. (2024). Review of fault detection techniques in power converters: Fault analysis and diagnostic methodologies. *Measurement*, 234, 114864. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.114864>.
11. Skliros, C., Esperon Miguez, M., Ali, F., & Jennions, I. K. (2018). A review of model based and data driven methods targeting hardware systems diagnostics. *Diagnostyka*, 20(1), 3–21. <https://doi.org/10.29354/diag/99603>.
12. Ren, J., Wen, J., Zhao, Z., Yan, R., Chen, X., & Nandi, A. (2024). Uncertainty-aware deep learning: A promising tool for trustworthy fault diagnosis. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 11(6), 1317–1330. <https://doi.org/10.1109/JAS.2024.124290>.
13. Xiao, B., Zhong, J., Bao, X., et al. (2024). Digital twin-driven prognostics and health management for industrial assets. *Scientific Reports*, 14, 13443. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-63990-0>.
14. Kumar, G. K., & Elangovan, D. (2020). Review on fault-diagnosis and fault-tolerance for DC–DC converters. *IET Power Electronics*, 13(1), 1–13. <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2019.0672>.
15. Li, J., Pan, K., Su, Q., & Zhao, X. (2019). Sensor fault detection and fault-tolerant control for Buck converter via affine switched systems. *IEEE Access*, 7, 1–1. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2909124>.
16. Butnicu, D. A. (2023). Derating-sensitive tantalum polymer capacitor's failure rate within a DC-DC eGaN-FET-based PoL converter workbench study. *Micromachines*, 14(1), 221. <https://doi.org/10.3390/mi14010221>.
17. Miao, J., Liu, Y., Yin, Q., Ju, B., Zhang, G., & Wang, H. (2024). A novel soft fault detection and diagnosis method for a DC/DC Buck converter based on contrastive learning. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 39(1), 1501–1513. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2023.3320878>.

18.Barrios, P. H., Rodríguez, F., Sánchez, P., Santos, C., Sangwongwanich, A., Novak, M., & Blaabjerg, F. (2025). Digital twin approach for fault diagnosis in photovoltaic plant DC–DC converters. *Sensors*, 25(14), 4323. <https://doi.org/10.3390/s25144323>.

19.Chen, Y., Zhang, D., Yan, R., & Xie, M. (2025). Applications of domain generalization to machine fault diagnosis: A survey. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*. <https://doi.org/10.1109/JAS.2025.125120>.

20.Pill, I., & de Kleer, J. (2024). Challenges for model-based diagnosis. *35th International Conference on Principles of Diagnosis and Resilient Systems (DX 2024)*, 125, 6:1–6:20. <https://doi.org/10.4230/OASIs.DX.2024.6>.

21.Bofill, J., Abisado, M., Villaverde, J., & Sampedro, G. (2023). Exploring digital twin-based fault monitoring: Challenges and opportunities. *Sensors*, 23(16), 7087. <https://doi.org/10.3390/s23167087>.

22.Chen, H., Zhang, Z., Karamanakos, P., & Rodriguez, J. (2023). Digital twin techniques for power electronics-based energy conversion systems: A survey of concepts, application scenarios, future challenges, and trends. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 17(2), 20–36. <https://doi.org/10.1109/MIE.2022.3216719>

23.Peng, Y., Zhao, S., & Wang, H. (2021). A digital twin based estimation method for health indicators of DC–DC converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 36(2), 2105–2118. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2020.3009600>.

24.Milton, M., De La O, C., Ginn, H. L., & Benigni, A. (2020). Controller-embeddable probabilistic real-time digital twins for power electronic converter diagnostics. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 35(9), 9850–9864. <https://doi.org/10.1109/tpel.2020.2971775>.

25.Song, Z., Hackl, C. M., Anand, A., et al. (2023). Digital twins for the future power system: An overview and a future perspective. *Sustainability*, 15(6), 5259. <https://doi.org/10.3390/su15065259>.

26.Song, E. Y., Burns, M., Pandey, A., & Roth, T. (2019). IEEE 1451 smart sensor digital twin federation for IoT/CPS research. *2019 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/SAS.2019.8706111>.

27.Ferko, E., Bucaioni, A., Pelliccione, P., & Behnam, M. (2023). Standardisation in digital twin architectures in manufacturing. *2023 IEEE 20th International Conference on Software Architecture (ICSA)*, 70–81. <https://doi.org/10.1109/ICSA56044.2023.00015>.

28.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>.

29.Fu, C., Gao, C., & Zhang, W. (2023). A digital-twin framework for predicting the remaining useful life of piezoelectric vibration sensors with sensitivity degradation modeling. *Sensors*, 23(19), 8173. <https://doi.org/10.3390/s23198173>.

30.Байда, В., & Велігорський, О. (2025). Методологія діагностики апаратного забезпечення з використанням інформаційної технології цифрового двійника. *Технічні науки та технології*, (2 (40)), 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).

31.Байда, В., & Велігорський, О. (2026). Ідентифікація паразитних параметрів моделі перетворювача постійного струму генетичним алгоритмом. *Технічні науки та технології*, (4 (42)), 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).

32.Riba, J.-R., Moreno-Eguilaz, M., Bogarra, S., & Garcia, A. (2018). Parameter identification of DC-DC converters under steady-state and transient conditions based on white-box models. *Electronics*, 7(12), 393. <https://doi.org/10.3390/electronics7120393>.

References

1. Wang, L., Zhu, F., Jiang, F., & Yang, Y. (2025). Power converter fault detection using MLCA–SpikingShuffleNet. *World Electric Vehicle Journal*, 16(1), 36. <https://doi.org/10.3390/wevj16010036>.

2. Saravanan, B., D, P., & Vengateson, A. (2025). *Benchmarking traditional machine learning and deep learning models for fault detection in power transformers*. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2505.06295>.

3. Ferreira Costa, L., & Liserre, M. (2018). Failure analysis of the dc-dc converter: A comprehensive survey of faults and solutions for improving reliability. *IEEE Power Electronics Magazine*, 5(4), 42–51. <https://doi.org/10.1109/MPEL.2018.2874345>.
4. Siemens. (2022). *The true cost of downtime 2022*. [White Paper/Report].
5. Yang, S., Xiang, D., Bryant, A. T., Mawby, P., Ran, L., & Tavner, P. J. (2010). Condition monitoring for device reliability in power electronic converters: A review. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 25(11), 2734–2752. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2010.2049377>.
6. Jain, P., Poon, J., Singh, J. P., Spanos, C., Sanders, S., & Panda, S. (2019). A digital twin approach for fault diagnosis in distributed photovoltaic system. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 35(1), 1–1. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2019.2911594>.
7. Lei, Z., Zhou, H., Dai, X., Hu, W., & Liu, G. P. (2023). Digital twin based monitoring and control for DC-DC converters. *Nature Communications*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-023-41248-z>.
8. Jia, Z., Liu, Z., Vong, C. M., Wang, S., & Cai, Y. (2023). DC-DC Buck circuit fault diagnosis with insufficient state data based on deep model and transfer strategy. *Expert Systems with Applications*, 213(Part A), 118918. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.118918>.
9. Ajra, Y., Hoblos, G., Al Sheikh, H., & Moubayed, N. (2024). A literature review of fault detection and diagnostic methods in three-phase voltage-source inverters. *Machines*, 12(9), 631. <https://doi.org/10.3390/machines12090631>.
10. Aviña-Corral, V., Rangel-Magdaleno, J. J., Barron-Zambrano, J. H., & Rosales-Nuñez, S. (2024). Review of fault detection techniques in power converters: Fault analysis and diagnostic methodologies. *Measurement*, 234, 114864. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.114864>.
11. Skliros, C., Esperon Miguez, M., Ali, F., & Jennions, I. K. (2018). A review of model based and data driven methods targeting hardware systems diagnostics. *Diagnostyka*, 20(1), 3–21. <https://doi.org/10.29354/diag/99603>.
12. Ren, J., Wen, J., Zhao, Z., Yan, R., Chen, X., & Nandi, A. (2024). Uncertainty-aware deep learning: A promising tool for trustworthy fault diagnosis. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 11(6), 1317–1330. <https://doi.org/10.1109/JAS.2024.124290>.
13. Xiao, B., Zhong, J., Bao, X., et al. (2024). Digital twin-driven prognostics and health management for industrial assets. *Scientific Reports*, 14, 13443. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-63990-0>.
14. Kumar, G. K., & Elangovan, D. (2020). Review on fault-diagnosis and fault-tolerance for DC-DC converters. *IET Power Electronics*, 13(1), 1–13. <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2019.0672>.
15. Li, J., Pan, K., Su, Q., & Zhao, X. (2019). Sensor fault detection and fault-tolerant control for Buck converter via affine switched systems. *IEEE Access*, 7, 1–1. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2909124>.
16. Butnicu, D. A. (2023). Derating-sensitive tantalum polymer capacitor's failure rate within a DC-DC eGaN-FET-based PoL converter workbench study. *Micromachines*, 14(1), 221. <https://doi.org/10.3390/mi14010221>.
17. Miao, J., Liu, Y., Yin, Q., Ju, B., Zhang, G., & Wang, H. (2024). A novel soft fault detection and diagnosis method for a DC/DC Buck converter based on contrastive learning. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 39(1), 1501–1513. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2023.3320878>.
18. Barrios, P. H., Rodríguez, F., Sánchez, P., Santos, C., Sangwongwanich, A., Novak, M., & Blaabjerg, F. (2025). Digital twin approach for fault diagnosis in photovoltaic plant DC-DC converters. *Sensors*, 25(14), 4323. <https://doi.org/10.3390/s25144323>.
19. Chen, Y., Zhang, D., Yan, R., & Xie, M. (2025). Applications of domain generalization to machine fault diagnosis: A survey. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*. <https://doi.org/10.1109/JAS.2025.125120>.
20. Pill, I., & de Kleer, J. (2024). Challenges for model-based diagnosis. *35th International Conference on Principles of Diagnosis and Resilient Systems (DX 2024)*, 125, 6:1–6:20. <https://doi.org/10.4230/OASICS.DX.2024.6>.
21. Bofill, J., Abisado, M., Villaverde, J., & Sampedro, G. (2023). Exploring digital twin-based fault monitoring: Challenges and opportunities. *Sensors*, 23(16), 7087. <https://doi.org/10.3390/s23167087>.

22. Chen, H., Zhang, Z., Karamanakos, P., & Rodriguez, J. (2023). Digital twin techniques for power electronics-based energy conversion systems: A survey of concepts, application scenarios, future challenges, and trends. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 17(2), 20–36. <https://doi.org/10.1109/MIE.2022.3216719>.
23. Peng, Y., Zhao, S., & Wang, H. (2021). A digital twin based estimation method for health indicators of DC–DC converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 36(2), 2105–2118. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2020.3009600>.
24. Milton, M., De La O, C., Ginn, H. L., & Benigni, A. (2020). Controller-embeddable probabilistic real-time digital twins for power electronic converter diagnostics. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 35(9), 9850–9864. <https://doi.org/10.1109/tpe.2020.2971775>.
25. Song, Z., Hackl, C. M., Anand, A., et al. (2023). Digital twins for the future power system: An overview and a future perspective. *Sustainability*, 15(6), 5259. <https://doi.org/10.3390/su15065259>.
26. Song, E. Y., Burns, M., Pandey, A., & Roth, T. (2019). IEEE 1451 smart sensor digital twin federation for IoT/CPS research. *2019 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/SAS.2019.8706111>.
27. Ferko, E., Bucaioni, A., Pelliccione, P., & Behnam, M. (2023). Standardisation in digital twin architectures in manufacturing. *2023 IEEE 20th International Conference on Software Architecture (ICSA)*, 70–81. <https://doi.org/10.1109/ICSA56044.2023.00015>.
28. 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>.
29. Fu, C., Gao, C., & Zhang, W. (2023). A digital-twin framework for predicting the remaining useful life of piezoelectric vibration sensors with sensitivity degradation modeling. *Sensors*, 23(19), 8173. <https://doi.org/10.3390/s23198173>.
30. Baida, V., & Velihorskyi, O. (2025). Metodolohiia diahnostryky aparatnoho zabezpechennia z vykorystanniam informatsiinoi tekhnolohii tsyfrovoho dviinyka [Methodology of hardware diagnostics using digital twin information technology]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii* [Technical Sciences and Technologies], 2(40), 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).
31. Baida, V., & Velihorskyi, O. (2026). Identyfikatsiia parazytnykh parametriv modeli peretvoriuvacha postiinoho strumu henetychnym alhorytmom [Identification of parasitic parameters of DC-DC converter model by genetic algorithm]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii* [Technical Sciences and Technologies], 4(42), 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).
32. Riba, J.-R., Moreno-Eguilaz, M., Bogarra, S., & Garcia, A. (2018). Parameter identification of DC-DC converters under steady-state and transient conditions based on white-box models. *Electronics*, 7(12), 393. <https://doi.org/10.3390/electronics7120393>.

Дата першого надходження статті до видання: 18.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 08.01.2026

UDC: 004.942

Vladyslav Baida¹, Oleksandr Velihorskyi²

¹PhD Student of the Department of informational and computer systems
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: Vladyslav.Baida@stu.cn.ua. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-2172-8057>
Google Scholar: <https://scholar.google.com/citations?user=J8RjmHwAAAAJ>

²Professor of the Department of Electronics, Automation, Robotics, and Mechatronics
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: o.veligorskiy@stu.cn.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8256-7339>
Google Scholar: <https://scholar.google.com/ua/citations?user=SWbfGzQAAAAJ>

INFORMATION TECHNOLOGY FOR HARDWARE DIAGNOSTICS OF DC-DC CONVERTERS BASED ON PHYSICALLY-INFORMED DIGITAL TWINS

The article addresses the critical challenge of ensuring the reliability of power electronics, specifically buck converters, by implementing a diagnostic methodology based on physically-informed digital twin technology. Unexpected failures in DC-DC converters lead to massive economic losses due to equipment downtime. Traditional diagnostic methods face significant

limitations: signal-based techniques are highly sensitive to noise, model-oriented approaches struggle with complex system modeling, and machine learning methods often lack the interpretability required for critical systems. The proposed information technology bridges these gaps by combining mathematical modeling with real-time data analysis. Using PySpice and Ngspice, the authors developed a high-fidelity model that incorporates parasitic parameters, including inductor resistance and capacitor ESR. This model serves as the digital twin's core, enabling the transition from reactive to proactive maintenance.

A key contribution of the study is the systematic construction of a correspondence table. By simulating six degrees of relative parameter changes (from "--" to "+++") for nine input variables, the authors established how deviations in internal components affect four output indicators: mean and pulse values of output voltage and inductor current. The correspondence table building algorithm utilizes a threshold value $\theta = 0.06$.

The methodology was validated using 6,705 experimental measurements obtained through the remote laboratory system based on the Lab Discovery Engine technology. Results demonstrated 100% efficiency in fault detection across all test scenarios, including deviations in PWM duty cycle, input voltage, and load resistance. The accuracy of identifying specific fault causes ranged between 85.1% and 100%, with minor inaccuracies attributed to hardware measurement noise rather than methodological flaws. This implementation provides a robust, interpretable, and computationally efficient framework for the real-time health monitoring of power electronic systems.

Keywords: digital twin; information technology; cyber-physical system; hardware diagnostics; predictive maintenance; power electronics; modeling.

Fig.: 3. Table: 16. References: 32.