

**Владислав Дмитрович Байда<sup>1</sup>, Олександр Анатолійович Велігорський<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>аспірант кафедри інформаційних та комп'ютерних систем

Національного університету «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: [Vladyslav.Baida@stu.cn.ua](mailto:Vladyslav.Baida@stu.cn.ua). ORCID: <http://orcid.org/0009-0004-2172-8057>

Google Scholar: <https://scholar.google.com/citations?user=J8RjmHwAAAAJ>

<sup>2</sup>кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри радіотехнічних та вбудованих систем

Національного університету «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: [o.veligorskiy@stu.cn.ua](mailto:o.veligorskiy@stu.cn.ua). ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8256-7339>

Google Scholar: <https://scholar.google.com.ua/citations?user=SWbfGzQAAAAJ>

## МЕТОДОЛОГІЯ ДІАГНОСТИКИ АПАРАТНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА

У статті запропоновано методологію діагностики апаратного забезпечення на основі цифрового двійника, що використовує векторне представлення вхідних та вихідних параметрів пристрою. Метод полягає в порівнянні векторів вимірних значень з еталонними, отриманими з цифрового двійника, з подальшою якісною інтерпретацією відхилень за допомогою таблиць відповідності. Такий підхід забезпечує стійкість до шумів, не потребує додаткових сенсорів і може працювати в режимі реального часу.

**Ключові слова:** цифровий двійник; інформаційна технологія; вектори; діагностика; апаратне забезпечення; методологія; таблиця відповідності.

Рис.: 7. Табл.: 3. Бібл.: 12.

**Актуальність теми дослідження.** У сучасному світі електроніка широко використовується у критичних застосуваннях – від енергетики і транспорту до промисловості та фінансових інформаційних систем. У цих сферах надзвичайно важливо забезпечити високу надійність і безперебійну роботу електронних систем протягом усього життєвого циклу [0]. Вихід із ладу силових перетворювачів чи компонентів цифрових систем може призводити до значних простоїв, фінансових втрат і навіть ризиків для життя людини. Для прикладу, вітроенергетика та авіоніка вимагають практично нульового рівня відмов, що ставить жорсткі вимоги до надійності електроніки [0]. Водночас багато елементів (конденсатори, друковані плати, напівпровідникові прилади тощо) мають обмежений ресурс і схильні до деградації: дослідження показують, що близько 30 % відмов у силових перетворювачах спричинені конденсаторами, ще ~36 % – несправностями плат і з'єднувачів, а решта – це відмови напівпровідникових приладів та пайки [0]. Така статистика вказує на необхідність постійного моніторингу стану компонентів для завчасного виявлення ознак старіння або пошкоджень, щоб запобігти раптовим збоям.

Відповідно, останнім часом у світі значно зросла увага до діагностики (diagnosis), прогнозування (prognosis) та моніторингу стану (condition monitoring) [0] компонентів електроніки з метою запобігання відмовам та некоректній поведінці. Дослідження, опубліковані останніми роками, пропонують численні методи моніторингу стану, наприклад: вимірювання параметрів працездатності (спад напруги на відкритому переході транзистора, ESR конденсатора тощо), впровадження додаткових сенсорів, аналіз віброакустичних сигналів [0], алгоритми глибокого навчання [0]. Такі підходи здатні оцінювати “стан здоров'я”, або параметри працездатності (State of Health) силових модулів і дозволяють планувати технічне обслуговування за станом, у випадку збільшення імовірності потенційної відмови, уникаючи таким чином аварійних простоїв.

Цифрові двійники (Digital Twins) сьогодні розглядаються як перспективне рішення для моніторингу стану електронних пристроїв у реальному часі. Цифровий двійник – це цифрова копія або віртуальна модель фізичної системи, що безперервно отримує дані від реального об'єкта [0-0]. Завдяки сучасним технологіям Інтернету речей (IoT), такі моделі

можуть відображати поточний стан двійника в режимі онлайн і оцінювати його стан здоров'я. Це відкриває можливість переходу від планового або реакційного технічного обслуговування до обслуговування за станом, коли рішення про ремонт чи заміну приймаються на основі фактичного технічного стану пристрою.

Впровадження цифрових двійників здатне знизити ризик раптових відмов та оптимізувати витрати на обслуговування за рахунок точнішого прогнозування [0] і діагностики стану електронних систем.

**Постановка проблеми.** Попри успіхи в цій галузі, певні проблеми залишаються відкритим. По-перше, багато відомих методів моніторингу є інтрузивними або дорогими. Для досягнення високої точності вони часто потребують додаткових сенсорів чи тестових схем або навіть втручання в роботу самого пристрою [1]. Особливо це помітно в підходах, що працюють на рівні окремих електронних компонентів, а не цілої системи [0]. Це підвищує вартість, а втручання у пристрій може бути непрактичним у реальних умовах, особливо в брудних чи вологих середовищах, де розгерметизація компонента недопустима. У результаті, технічному персоналу часто бракує повної інформації про поточний технічний стан пристрою під час експлуатації [7]. Наприклад, існуючі методи контролю стану конденсаторів або потребують додаткового обладнання, або дають занадто низьку точність, що ускладнює їх впровадження в промисловості [8]. Обслуговування здійснюється або періодично за напрацьованим часом, або після того, як вже сталася відмова. Такий підхід не дозволяє завчасно виявити деградацію, що накопичується, наприклад, поступове висихання електролітичного конденсатора чи термомеханічну втому пайки, допоки компонент не вийде з ладу. Як наслідок, відмови трапляються непередбачено, тому превентивне детектування деградації пристрою до моменту катастрофічної відмови є необхідним заходом.

По-друге, діагностика несправностей в режимі реального часу залишається викликом. Наприклад, силові перетворювачі працюють на високих частотах комутації, тож щоб виявляти деградацію компонентів за їхніми робочими сигналами, потрібні високоточні моделі і швидке вимірювання. Виконати моделювання в режимі реального часу з потрібною роздільною здатністю часового кроку буває важко через обмеження обчислювальних ресурсів [8].

По-третє, класичні засоби діагностики й захисту (датчики, періодичні огляди стану пристроїв технічним персоналом тощо) не в змозі повністю охопити складні фізичні процеси, що відбуваються в сучасних електронних системах. Електронний пристрій – це сукупність багатьох компонентів, що взаємодіють. Таким чином, нагрів елементів, механічні напруження, електричні перевантаження тощо можуть одночасно впливати на різні частини системи. Традиційний моніторинг (наприклад, контроль окремих параметрів – температури, струму, напруги) часто не виявляє прихованих ознак деградації або не дає цілісної картини про стан системи [0].

Ці проблеми пов'язані з апаратними обмеженнями, бо для повного моніторингу потрібно було б вбудувати у пристрій багато додаткових датчиків (наприклад, датчики напруги на кожному компоненті тощо), що збільшує складність, розміри й вартість системи. Також датчики потребують калібрування та можуть самі по собі поводитися некоректно. Таким чином, актуальним є завдання підвищення рівня моніторингу стану електронних систем без надмірного ускладнення апаратного забезпечення. Цифровий двійник здатний діяти як “віртуальний датчик”: він працює паралельно з реальним пристроєм та на основі доступних вимірювань моделює ті величини і процеси, які не вимірюються безпосередньо [0]. Таким чином, цифрові двійники вирішують проблему браку інформації про поточний стан кожного з компонентів пристрою і дозволяють виявляти відхилення до того, як вони спричинять відмову. Це надає можливість своєчасної діагностики й подальшого обслуговування системи, підвищуючи її надійність.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій** показує, що інтенсивні дослідження в цій галузі розпочалися протягом останнього десятиліття, і кількість наукових праць активно росла з кожним роком [0].

Для розв'язання вказаних проблем перспективним підходом є використання цифрових двійників, що дозволяє реалізувати моніторинг в реальному часі з гнучким масштабуванням складності й точності моделей залежно від вимог конкретних задач. Це забезпечує баланс між обчислювальною швидкістю, точністю діагностики та вартістю реалізації, що особливо важливо для застосування в реальних промислових умовах [0].

Нині можна відзначити кілька напрямків розвитку цифрових двійників для моніторингу стану електроніки. Загалом підходи поділяються на моделі, засновані на фізичних принципах, алгоритмах штучного інтелекту та гібридні рішення, що поєднують обидва підходи [0]. Нижче наведено детальний опис цих підходів:

**Моделі, що засновані на фізичних принципах.** Цифровий двійник створюється у вигляді детальної математичної моделі пристрою, що відтворює реальні фізичні процеси (електричні, теплові, механічні) у часі. Наприклад, для силового перетворювача може бути використана еквівалентна схема, яка в режимі реального часу розраховує струми, напруги та температуру ключових компонентів, віддзеркалюючи фактичну роботу пристрою. Такі моделі можуть включати відомі механізми зношування. Наприклад, залежність параметрів від температури чи циклів навантаження, щоб оцінити деградацію елементів. Моделі можуть бути реалізовані як на основі виведених формул для конкретного електронного пристрою, як це зроблено в дослідженні [0], так і шляхом використання програмних інструментів для моделювання. У дослідженні [0] реалізовано віртуальну копію трифазного перетворювача на основі його схемної моделі, яка паралельно з реальним інвертором розраховує ключові вихідні сигнали. Це дозволило безперервно відстежувати стан компонента (LC-фільтра на виході) та оцінювати його деградацію за зміною параметрів моделі. Використовуючи алгоритми оптимізації (Particle Swarm Optimization та генетичний алгоритм) для калібрування параметрів цифрового двійника, автори досягли високої точності ідентифікації погіршення ємності конденсатора фільтра. Важливо, що такий моніторинг здійснювався онлайн і не потребував додаткових датчиків – цифровий двійник виступав джерелом даних про стан компонента. Перевагою фізичних моделей є їхня інтерпретованість – вони ґрунтуються на реальних фізичних явищах, тому можуть пояснити, чому відбувається та чи інша деградація. До недоліків належать висока складність створення точних моделей складних пристроїв і значні обчислювальні витрати при їх реальному застосуванні.

**Моделі, що засновані на штучному інтелекті.** Цей підхід полягає у створенні цифрового двійника як набору алгоритмів, що навчені на даних експлуатації пристрою. У цьому випадку детальне фізичне моделювання може бути замінене або доповнене методами машинного навчання, які виявляють приховані закономірності в поведінці системи за історичними даними. Іншими словами, даний підхід можна назвати data-driven [6]. Наприклад, нейронна мережа або інший ML-алгоритм може передбачати наближення відмови компонента, аналізуючи тренди вимірних сигналів (струмів, температур, часу перемикання транзисторів тощо) [0]. В електроніці прикладами можуть бути системи діагностики, що на основі даних виявляють характерні ознаки наближення відмов (наприклад, збільшення амплітуди пульсації напруги як наслідок деградації конденсатора). Перевага data-driven підходу – здатність обробляти великий обсяг датчикових даних і знаходити складні залежності, не потребуючи повного фізичного опису. Це особливо корисно, коли фізичні моделі невідомі або надто складні. Недоліком є залежність від якості і обсягу наявних даних: модель «чорної скриньки» може видавати неточні прогнози за умов, відмінних від тих, на яких її навчено, а також її важче інтерпретувати з погляду фізики процесів [0].

**Гібридні підходи.** Найсучаснішим трендом є комбінування фізичних моделей та моделей, що засновані на штучному інтелекті в межах одного цифрового двійника. Такий підхід також відомий як гібридне прогнозування стану (Hybrid Prognostic and Health Management, PHM) [0]. Ідея полягає в тому, щоб використовувати сильні сторони обох методів: фізична модель надає структурну та причинно-наслідкову основу, а штучний інтелект доповнює її, обробляючи реальні дані та компенсуючи неточності або невраховані фактори моделі. У новітніх публікаціях пропонуються архітектури цифрових двійників із двома гілками – модель деградації на основі фізики та модель, навчена на даних [0]. Таким чином, дослідники з Delft University запропонували узагальнену двогілкову модель цифрового двійника для мікроелектронних компонентів, яка чітко розділяє віртуальний простір на дві частини: перша гілка моделює процеси старіння (physics-of-degradation та physics-of-failure), а друга гілка – обробляє дані сенсорів і застосовує ШІ для виявлення аномалій та прогнозування залишкового ресурсу [0]. Такий підхід дозволяє одночасно врахувати відому фізику відмов і статистичні закономірності з експлуатації. Очікується, що гібридні методи підвищують точність оцінки стану і надійність прогнозу, порівняно з використанням лише одного підходу.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Попри досягнутий прогрес, багато важливих аспектів застосування цифрових двійників в електроніці залишається недостатньо вивченим або потребує подальших досліджень. По-перше, відсутні усталені стандарти та протоколи для інтеграції цифрових двійників в сфері моніторингу стану у реальні експлуатаційні умови [0]. Потрібна уніфікація форматів даних, інтерфейсів обміну інформацією між фізичним пристроєм і його цифровою копією, а також вирішення питань кібербезпеки при такому обміні [0].

По-друге, сама побудова цифрового двійника для складних електронних систем стикається з викликом забезпечення достатньо високого співвідношення точності до швидкодії. Детальні і мультифізичні моделі (що враховують, наприклад, електричні, теплові, механічні процеси та їх взаємодію, а також старіння матеріалів) є важкими для реалізації в режимі реального часу [0]. З іншого боку, спрощені моделі, придатні для швидкого виконання (Edge computing, тобто технологія обчислень “на краю мережі”), можуть втрачати точність і адекватність при нестандартних впливах [0]. Тому виникає потреба в створенні компактних моделей, які збалансують швидкодію і вірогідність результатів.

По-третє, залишається відкритим питання визначення критеріїв відмови і залишкового ресурсу (Remaining Useful Life, RUL) у межах цифрового двійника. Щоб двійник не лише виявляв дефекти, а й передбачував та давав прогноз часу до відмови, необхідно точно знати граничні значення параметрів, при перевищенні яких слід вживати заходів [0]. В електроніці часто спостерігається одночасний вплив декількох механізмів деградації (наприклад, термічна втома й електроміграція можуть разом призводити до відмови мікросхеми). Наразі немає повного розуміння, як об’єднати вплив різних деградаційних факторів у рамках однієї моделі, щоб вона давала коректний прогноз залишкового ресурсу [0].

Іншими словами, одним із найважливіших напрямків розвитку цифрових двійників для діагностики та моніторингу стану електронних пристроїв є розробка методології, що дозволяє побудувати ефективні і водночас компактні моделі для швидкої та точної діагностики у реальному часі, що дозволить запускати ці моделі безпосередньо на стороні самого пристрою (Edge computing) на відміну від дорогих хмарних рішень [0]. До того ж така методологія має бути уніфікована й мати змогу відстежувати процес деградації пристрою. Більшість наявних рішень базуються або на дуже складних фізичних моделях, що потребують значних обчислювальних ресурсів, або на алгоритмах машинного навчання, які, своєю чергою, вимагають великої кількості історичних даних і складних процедур навчання. Це створює виклик, який вимагає знайти баланс між точністю діагностики,

швидкодією та простотою практичного застосування, особливо для електронних пристроїв з обмеженими обчислювальними ресурсами чи обмеженим доступом до даних у реальному часі.

**Метою статті** є розробка методології діагностики технічного стану електронних пристроїв на основі інформаційної технології цифрових двійників, яка дозволяє підвищити точність, швидкість і надійність моніторингу стану апаратного забезпечення за рахунок використання якісних таблиць відповідності та якісної оцінки параметрів, забезпечуючи при цьому високу практичність реалізації і простоту використання. Ця методологія зможе використовувати лише значення, отримані на виходах пристрою, без необхідності вимірювання відповідних значень кожного компоненту окремо, при цьому діагностуючи проблему в конкретному компоненті, а не тільки в поведінці пристрою загалом.

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

Вхідними значеннями  $x_i$  являються як фізичні величини, що подаються на схему ззовні (вхідна напруга перетворювача напруг тощо), так і властивості самої схеми (опори фіксованих резисторів, опори діодів тощо). В ідеалі вектор  $\bar{X}$  має покривати всі можливі значення, що мають вплив на поведінку схеми. Для практичного застосування це не завжди є можливим чи доцільним з погляду балансу між точністю діагностики та простотою реалізації. Наявність властивостей самої схеми серед компонентів вектора  $\bar{X}$  додає можливість детектувати помилки в номіналах, або ж граничні умови (обриви та короткі замикання) відповідних елементів схеми.

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

Умова нерівності вхідних векторів  $\bar{X}_{DT}$  і  $\bar{X}_{meas}$  має вигляд:  $\bar{X}_{DT} \neq \bar{X}_{meas} \Leftrightarrow \exists i \in \{1, 2, \dots, n\}, x_{DT,i} \neq x_{meas,i}$ . Тобто вхідні вектори є рівними тоді й тільки тоді, коли кожен відповідний компонент даних векторів є рівними.

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

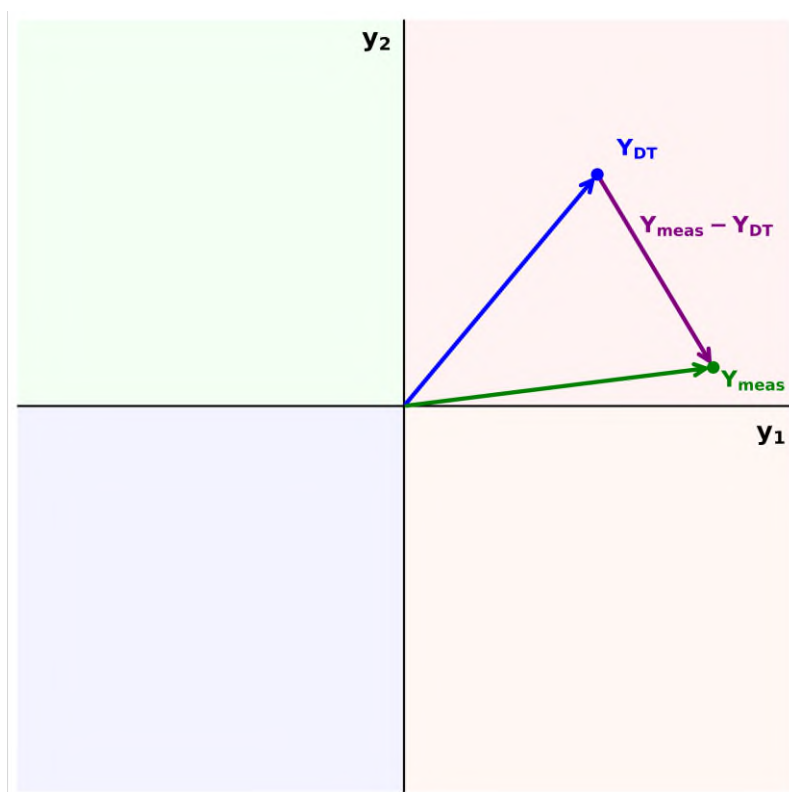


Рис. 1. Зображення двох різних векторів та їх різниці у двовірному просторі  
Джерело: розроблено авторами.

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

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

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

Для спрощення подальших розрахунків треба нормалізувати вектор різниці векторів  $\bar{Y}_{meas}$  та  $\bar{Y}_{DT}$  так, що нормалізований вектор має такий вигляд:  $\Delta\tilde{Y}_{ij} = (\bar{Y}_i - \bar{Y}_j) \oslash Y_j$ , де  $i \neq j$ , а  $\oslash$  це операція ділення Адамара (поелементне ділення векторів). Така нормалізація дозволяє уніфікувати систему координат і виражати кожен компонент нормалізованого вектора як відношення відповідних компонентів заданих векторів. Відповідні компоненти вектора  $\Delta\tilde{Y}_{ij}$  позначаються як  $\tilde{y}_k$ .

Якщо нормалізувати  $\Delta\bar{Y}_{meas,DT}$ , то отримаємо  $\Delta\tilde{Y}_{meas,DT}$ , й перенісши початок вектора  $\Delta\tilde{Y}_{meas,DT}$  на початок координат, отримаємо представлення, показане на рис. 2.

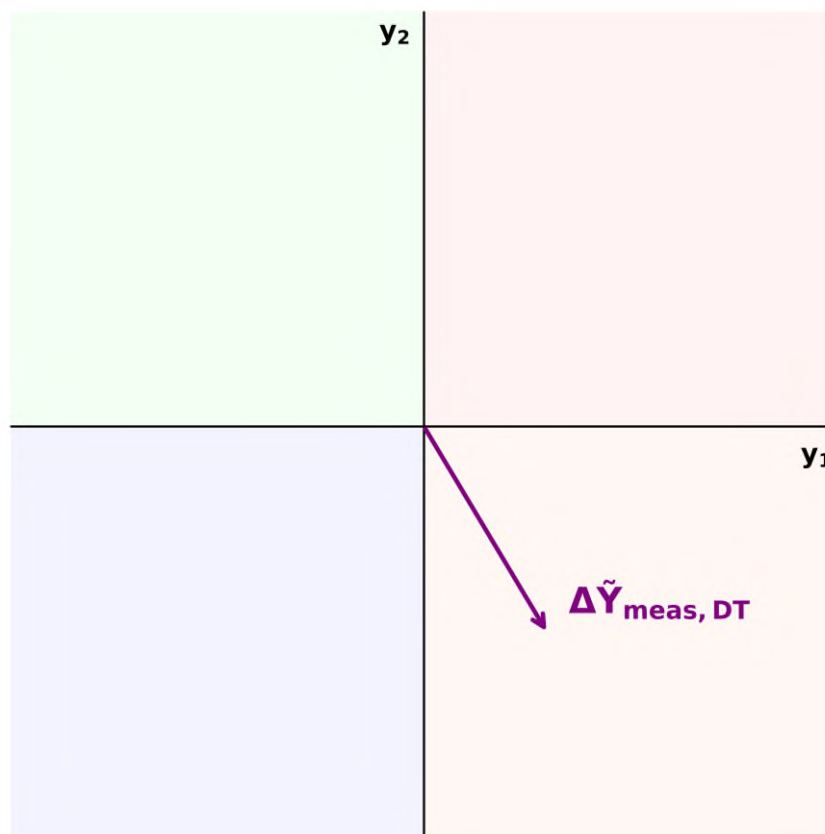


Рис. 2. Зображення нормалізованої різниці векторів у двомірному просторі  
Джерело: розроблено авторами.

З рис. 2 видно, що, крім норми вектора  $\Delta\tilde{Y}_{meas,DT}$ , можливо визначити й напрямок цього вектора (а отже, і напрямок відхилення  $\bar{Y}_{meas}$  від  $\bar{Y}_{DT}$ ) у просторі. Важливо зазначити, що відносна нормалізація не має впливу на напрямок вектора. Ігноруючи значення норми, ми можемо звести задачу формування таблиці відповідності, що була згадана вище, до таблиці відповідності напрямку вектора різниці вихідних значень до напрямку вектора різниці вхідних значень.

У двомірному просторі (як показано на рис. 3), нормалізований вектор різниці між значеннями з реального пристрою та значеннями, отриманими з математичної моделі, може відхилятися в один із чотирьох квадрантів (вектори  $\Delta\tilde{Y}_{meas1,DT}$ ,  $\Delta\tilde{Y}_{meas2,DT}$ ,  $\Delta\tilde{Y}_{meas3,DT}$  і  $\Delta\tilde{Y}_{meas4,DT}$ ). Особливої уваги потребує ситуація, коли один з векторів розташований на (або дуже близько до) одній з осей координат (як вектор  $\Delta\tilde{Y}_{meas5,DT}$ ), про що буде сказано пізніше. Таким чином, таблиця відповідності в ідеальному випадку має містити принаймні один рядок для кожного з квадрантів у випадку двомірного простору. У випадку  $k$ -мірного простору таких рядків, відповідно, має бути  $2^k$ , по одному на кожен можливий напрямок (сектор) відхилення. У реальних задачах, як буде розглянуто пізніше, це не є завжди можливим і доцільним.

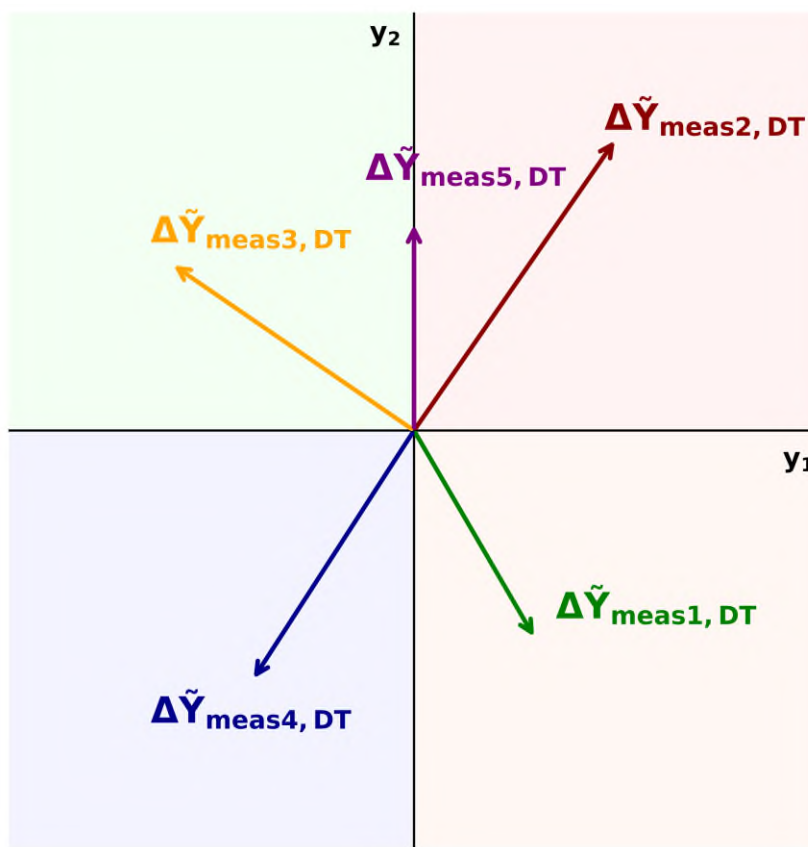


Рис. 3. Приклад декількох векторів, кожен з яких направлений в іншу сторону  
Джерело: розроблено авторами.

Ігнорування значення відстані (норми вектора) дозволяє задати кожен рядок таблиці відповідності вектором  $\bar{R} = [r_1, \dots, r_m]$ , де  $m$  – це довжина вектора вихідних значень схеми  $\bar{Y}$ , а  $r_i \in \{+, -\}$ , де “+” означає, що в цьому секторі простору (квадранті у випадку  $m = 2$ , октанті у випадку  $m = 3$  і т. д.) цей компонент вектора  $\bar{Y}_{meas}$  (вимірів із реального пристрою) більше за відповідний компонент вектора  $\bar{Y}_{DT}$ ; “-”, аналогічно, означає, що менше. Такий підхід знижує точність діагностики, оскільки ігнорує конкретні значення, проте значною мірою знижує складність формування таблиці відповідності та, як результат, практичної імплементації методології.

Отже, таблиця 1 має мати такий формат (у випадку  $m = 2$ ):

Таблиця 1 – Шаблон таблиці відповідності при  $m = 2$

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

Джерело: розроблено авторами.

Методологія має на увазі порівняння реально вимірних виходів із виходами ідеальної математичної моделі. Це накладає свої обмеження на точність порівняння, оскільки, по-перше, неможливо створити математичну модель, що ідеально відповідає реальній через наявність паразитних параметрів і, по-друге, випадкові шуми вимірювань унеможливають точний збіг  $\bar{Y}_{meas}$  та  $\bar{Y}_{DT}$ . Це призводить до необхідності створення “сірої зони” навколо



точки, що знаходиться на початку координат (оскільки початок вектора  $\Delta\check{Y}_{meas,DT}$  переноситься на початок координат). Одним зі способів формування сірої зони є створення відповідної гіперсфери у  $m$ -мірному просторі з центром у початку координат, що дозволить порівнювати встановлений радіус  $\rho$  цієї гіперсфери з відстанню  $\|\Delta\check{Y}_{meas,DT}\|$  так, що за умови  $\|\Delta\check{Y}_{meas,DT}\| \leq \rho$  поведінка пристрою, який відповідає вектору  $\bar{Y}_{meas}$ , вважається коректною (справною), як зображено на рис. 4. Проте такий підхід можна покращити, відмовившись від гіперсфери з радіусом  $\rho$  на користь порогових значень, які є унікальними для кожного компонента вихідного вектора, що буде показано в подальшому.

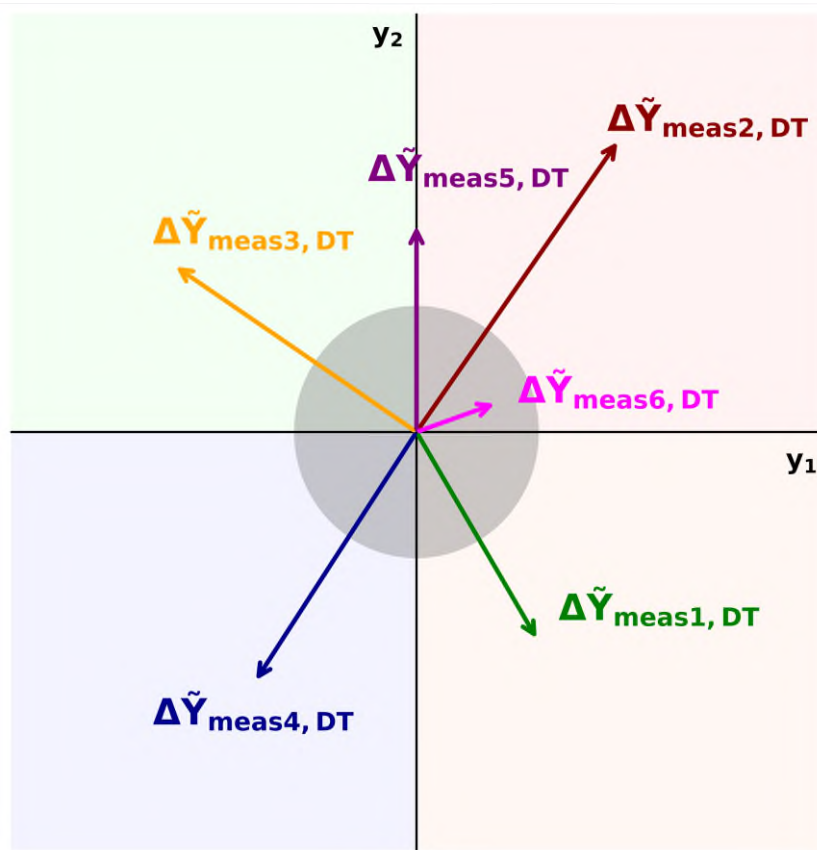


Рис. 4. Зображення сірої зони навколо початку координат

Джерело: розроблено авторами.

На рис. 4 зображено вектор  $\Delta\check{Y}_{meas6,DT}$ , який розташований у межах допустимого відхилення від початку координат. Іншими словами, можна сказати, що електронний пристрій, що діагностується, поводить себе коректно при заданих входах  $\bar{X}_{meas6}$ . У такому випадку, вочевидь, використання таблиці відповідності не є актуальним, оскільки таблиця потрібна для пошуку причини проблеми, а вектор  $\bar{Y}_{meas6}$  не містить значення, які методологія вважає за ті, що символізують наявність проблеми.

Для практичного використання таблиці користувачу (людині, або програмному забезпеченню) потрібно визначити вектор  $\bar{R}$  шляхом аналізу відхилення виходів реального обладнання від математичної моделі, і, при перевищенні порогового значення, шляхом пошуку по таблиці визначити причину несправності пристрою.

Описані вище перешкоди у порівнянні реальних значень з результатами математичної моделі також вносять свою складність у тому випадку, коли точка, що відображає реально виміряний з обладнання вектор, розташована близько до однієї з осей, як, напри-

клад, вектор  $\Delta\tilde{Y}_{meas7,DT}$  на рис. 5. Дивлячись на цей вектор, який розташований у квадранті I, що відповідає вектору  $\bar{R}_7 = [+ , +]$ , можливо припустити, що через шуми вимірювань чи інші перешкоди,  $\Delta\tilde{Y}_{meas7,DT}$  насправді (відкинувши шуми і неідеальності реального обладнання) може мати розташування, близьке до  $\Delta\tilde{Y}_{meas8,DT}$  з відповідним вектором  $\bar{R}_8 = [+ , -]$ . Можливим розв'язком цієї проблеми є формування “сірої зони” також вздовж осей, як і зображено на рисунку 5. Відповідний  $r_i$  тоді слід позначити “0”, тобто в цьому випадку  $\bar{R}_7 = \bar{R}_8 = [+ , 0]$ . Значення ширини сірої зони для кожного вихідного значення може бути різним. Таким чином, ця характеристика має вигляд вектора  $\bar{\theta} = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m]$ , де  $m$  – довжина вихідного вектору, а  $\theta_i$  означає ширину сірої зони  $i$ -го компонента відповідного вектору  $\Delta\tilde{Y}$ . Оскільки відповідний вектор  $\Delta\tilde{Y}$  є нормалізованим, то порогове значення також виражається в нормалізованих одиницях (фактично відсотках), що виглядає таким чином:  $r_i = 0 \Leftrightarrow |\tilde{y}_i| < \theta_i$ . Порогові значення слід визначати, виходячи з конкретної практичної задачі. Для спрощення імплементації алгоритму можливо ввести загальне значення  $\theta$  таке, що  $\exists \theta \in R: \forall i \in \{1, \dots, m\}, \theta_i = \theta$ . Іншими словами,  $\theta$  слугує загальним значенням (однаковим для всіх компонентів), вираженим у нормалізованих одиницях (відсотках), яке задає ширину сірої зони.

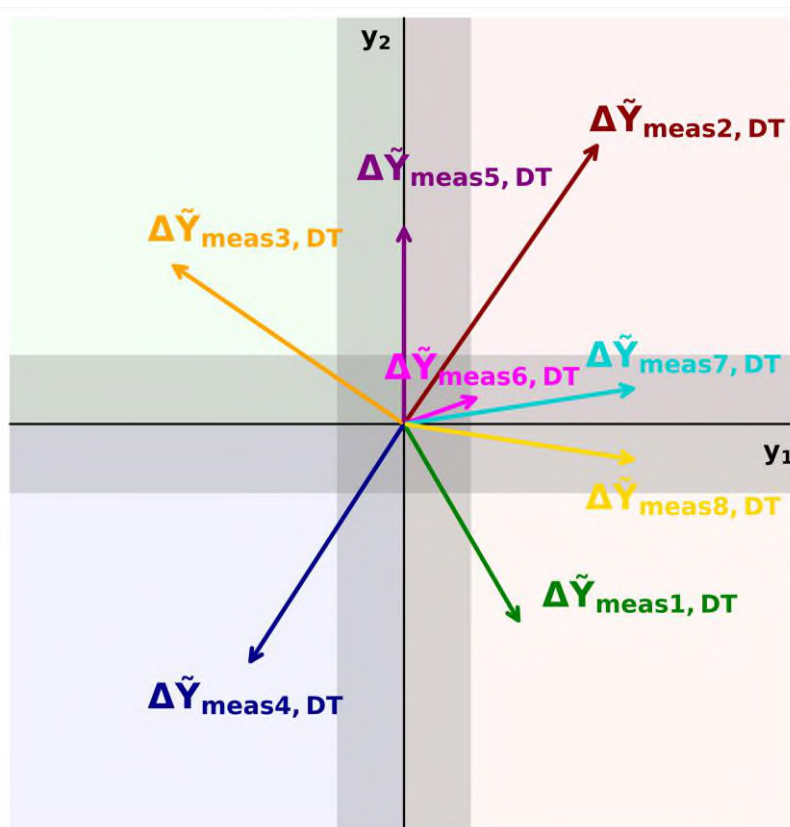


Рис. 5. Сіра зона вздовж осей координат

Джерело: розроблено авторами.

При спробі пошуку по таблиці відповідності, компоненти вектора  $\bar{R}$ , що мають значення “0” можна одночасно сприймати як “+” і як “-”, що, в результаті, збільшить кількість знайдених рядків в таблиці, а отже, і кількість потенційних причин виникнення некоректної поведінки обладнання. Таким чином, методологія стає більш стійкою до неточностей вимірювань (шумів і т. ін.).

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

Результат пошуку в таблиці має вказувати на конкретну причину (або набір можливих причин), що призвели до некоректної роботи електронного пристрою. Оскільки вхідні вектори  $\bar{X}_{DT}$  та  $\bar{X}_{meas}$  складаються, в ідеальному випадку, з усіх факторів, що мають вплив на поведінку пристрою (як реального, так і моделі), то і, відповідно, причиною дефектності вихідного вектора  $\bar{Y}_{meas}$  є відхилення вектора  $\bar{X}_{meas}$  від вектора  $\bar{X}_{DT}$  як мінімум в одній з пар компонентів векторів, що впливає з визначення нерівності векторів. Запропонована методологія розглядає лише одиничні дефекти (відхилення лише одного компонента вектора  $\bar{X}_{meas}$  від відповідного компонента вектора  $\bar{X}_{DT}$ ), але може бути розширена на їх комбінації, що підвищить точність діагностики в більш комплексних випадках.

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

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

Таблиця 2 – Приклад таблиці відповідності вектора  $\bar{E}$  до  $\bar{R}$

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

Джерело: розроблено авторами.

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

Запропонований вище формат таблиці може бути достатньо ефективним і точним для багатьох електричних схем і його можна використовувати для реальних застосунків. Водночас він ігнорує той факт, що при різних кратностях зміни вхідних значень ( $\times 10, \times 1e6, \times 1e12$ ) вплив на вихідне значення буде різним, як зображено на рис. 6.

На рис. 6 зображено приклад можливого впливу зміни компонента  $x_1$  вхідного вектора  $\bar{X}$  на компонент  $y_1$  вихідного вектора  $\bar{Y}$ . По обох осях зображені множники зміни відповідних значень. Червона штрихована лінія зображує межу, до якої  $r_1$  приймає значення “0”, а після якої – “-”, як було описано вище. Цей приклад показує, що залежно від кратності зміни вхідного значення, вплив на вихідне значення може бути різним.

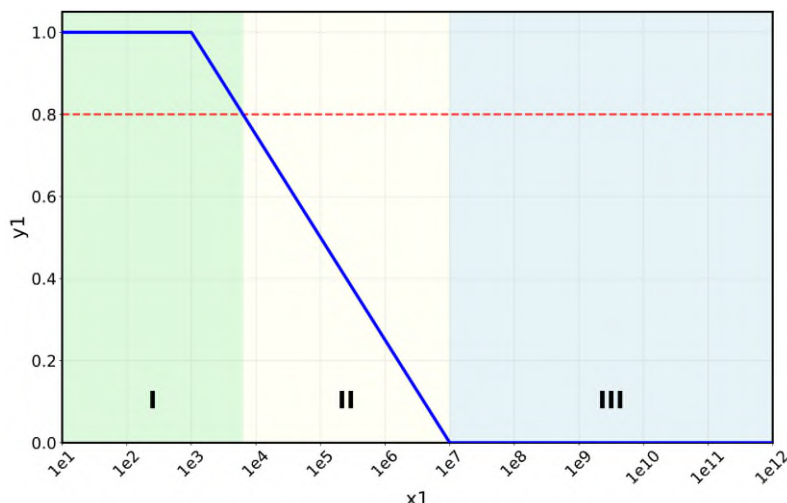


Рис. 6. Зображення різних зон значення  $x_1$ , що впливає на значення  $y_1$   
Джерело: розроблено авторами.

Графік поділено на 3 зони:

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

II. Зона, де множник  $y_1$  знаходиться у проміжку (0.8; 0). Це є зона, яка відповідає  $r_1 = \langle - \rangle$ .

III. Зона, починаючи з якої значення  $y_1$  стає "0". Ця зона також відповідає  $r_1 = \langle - \rangle$ , але вона може відмінний від зони II фізичний сенс. Наприклад, якщо  $x_1$  це певний опір, а  $y_1$  – напруга, то в зоні III настає момент, коли опір починає поводити себе як розрив на схемі.

Таким чином, для покращення точності діагностики, гарним рішенням є перетворення вектора  $\bar{E}$  на вектор множинних станів. У такому випадку,  $\bar{E} = [e_1, e_2, \dots, e_n]$ ,  $e_i \subseteq \{0\} \cup \{+k, -k | k \in N, 1 \leq k \leq K\}$ , де  $n$  – довжина вхідного вектора  $\bar{X}$ , а  $K$  – ціле позитивне число, що задає максимальну кратність повторення знаків «+» або «-» («0» нема сенсу повторювати). Кількість повторення знаків відображає відносний ступінь зміни. У прикладі з рис. 6,  $K = 2$  (тобто ми допускаємо максимум дві ступені зміни). Однак ця кількість може бути змінена за потреби.

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

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

У випадку рисунка 6 зона I відповідає  $e_1 = \{0\}$ , зона II відповідає  $e_1 = \{-\}$ , а зона III –  $e_1 = \{--\}$ .

Таким чином, типовий приклад модифікованого вектора  $\bar{E}$  в таблиці може мати вигляд  $\bar{E} = [\{+, ++\}, \{0\}, \{-\}, \{--\}]$ , де кожна множина  $e_i$  описує можливі ступені впливу відповідного компонента вхідного вектора  $\bar{X}$  на відповідну зону відхилення вихідних параметрів пристрою.

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

**Методи генерації таблиць відповідності.**

Для практичного застосування запропонованої методології критично важливим є систематичний підхід до побудови таблиць відповідності. Пропонується три основні методи генерації таких таблиць, які можуть використовуватися окремо або в комбінації залежно від специфіки пристрою.

*Метод систематичного моделювання*

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

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

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

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

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

*Метод аналітичного виводу для простих схем*

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

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

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

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

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

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

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

*Метод формалізації експертних знань*

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

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

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

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

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

*Гібридний підхід до генерації таблиць*

На практиці рекомендується комбінувати описані методи:

1. Початкова генерація: Використання аналітичного виводу (для простих пристроїв) або систематичного моделювання (для складних).

2. Валідація: Перевірка отриманих правил за допомогою експертних знань.

3. Уточнення: Корекція таблиць на основі реальних експлуатаційних даних.

**Результати дослідження.**

**Перевагами** представленої методології є:

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

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

3. *Низькі вимоги до обчислювальних ресурсів.* Шляхом використання алгоритму на тих самих входних значеннях пристрою, можливо використати цифровий двійник лише один раз для кожного конкретного набору входних значень, а в подальшому використовувати результати цієї симуляції без повторної потреби в запуску самої симуляції. Усі інші дії алгоритму, що описані в пункті 2 переваг є простими математичними операціями, що дозволяє запускати алгоритм навіть на малопотужному обладнанні на кшталт одноплатних комп'ютерів чи навіть мікроконтролерів. До того ж таблиця відповідності є досить компактною, що не вимагає великих обсягів пам'яті для її збереження.

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

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

**Реалізація методології.** Перед використанням методології необхідно виконати етап ініціалізації, який складається з таких кроків:

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

2. *Створення таблиці відповідності.* Використовуючи один із трьох запропонованих методів (систематичного моделювання, аналітичного виводу, формалізації експертних знань) або будь-який інший.

3. *Налаштування ширини сірої зони.* Визначення  $\theta_i$  для кожного компонента окремо або ж визначення загального значення  $\theta$ .

4. *Калібрування системи.* Тестування і валідація значень таблиця відповідності.

Використання цієї методології виконується шляхом періодичного (частота та умови залежать від конкретного застосування) запуску алгоритму, що отримує пари входного і вихідного векторів, визначає відповідний вектор  $\bar{R}$ , а далі аналізує їх за допомогою таблиці відповідності. Якщо з кожним наступним запуском алгоритму робити вимірювання зберігаючи такі ж самі значення входного вектора, то, зберігаючи отримані пари векторів, можна відстежувати дрейф вектора  $\bar{Y}_{meas}$  в просторі, а отже, і швидкість та напрямок деградації поведінки електронного пристрою, що відкриває можливості для покращення методології в бік прогнозування часу до виникнення дефекту. Це відкриває можливість для подальшого розвитку методології, а саме розробки алгоритму відстежування змін поведінки пристрою і прогнозування відмови на основі характеру і швидкості даних змін.

Методологія використовує скалярні значення як компоненти входних і вихідних векторів. Використання векторних значень для детектування некоректної поведінки пристроїв також можливе, наприклад як RMS відхилення вихідного сигналу реального електронного пристрою від математичної моделі. Проте така метрика не може надати необхідного "напряму" відхилення, що не дозволить діагностувати, власне, причину некоректної поведінки.

На рис. 7 зображено блок-схему алгоритму реалізації методології в базовому вигляді, без врахування дрейфу  $\bar{Y}_{meas}$ :

**Ініціалізація системи:**

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

**Періодичний алгоритм:**

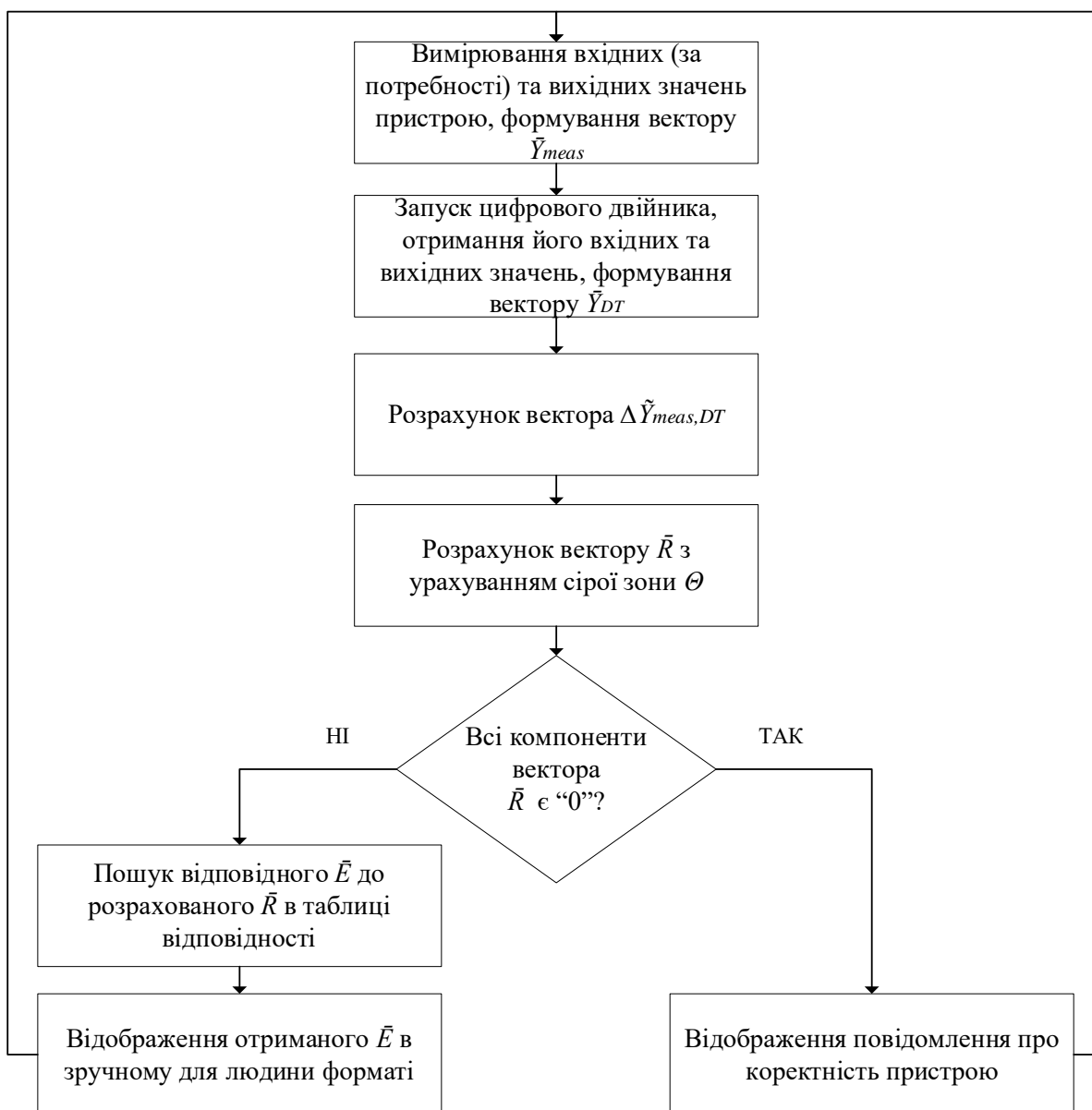


Рис. 7. Блок-схема реалізації методології

Джерело: розроблено авторами.

**Приклад використання.** Розглянемо приклад використання періодичного алгоритму даної методології для найпростішої електричної схеми – дільника напруги. Схема виглядає таким чином (рис. 8):

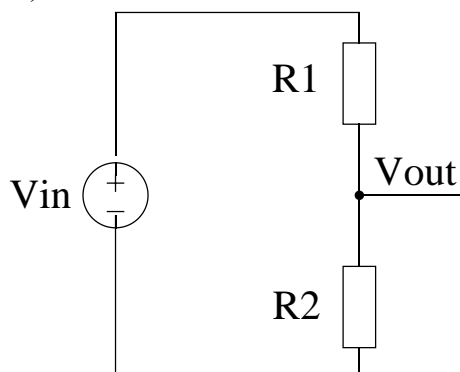


Рис. 8. Схема дільника напруги для прикладу використання методології  
Джерело: розроблено авторами.

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

Припустимо, що ширина сірої зони становить 5 %, а отже,  $\bar{\theta} = [\theta_1, \theta_2] = [0,05,0,05]$ , а таблиця відповідності (табл. 3) вже визначена і має такий вигляд (вона відповідає дійсності для дільника напруги):

Таблиця 3 – Таблиця відповідності вектора  $\bar{E}$  до  $\bar{R}$  для прикладу з дільником напруги

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

Джерело: розроблено авторами.

1. Визначимо вхідні та вихідні вектори цього пристрою. Входами системи є значення напруги  $V_{in}$  та опорів  $R1$  та  $R2$ . Отже, вхідний вектор має вигляд  $\bar{X} = [V_{in}, R1, R2]$ . Виходами системи слугують напруга на виході  $V_{out}$  та струм через опори  $I$ . Отже, вихідний вектор має вигляд  $\bar{Y} = [V_{out}, I]$ , де  $V_{out} = \frac{V_{in} \times R2}{R1 + R2}$ , а  $I = \frac{V_{in}}{R1 + R2}$ .

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

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

4. Застосуємо сіру зону

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

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

Отже, результуючий вектор має вигляд  $\bar{R} = [-, +]$ . Пошук по таблиці відповідності (табл. 3) по заданому  $\bar{R}$  вказує на причину  $\bar{E} = [0, 0, -]$ , що означає занижене значення  $R2$ , що, і є правильною причиною відхилення вихідних значень.

**Порівняння з традиційною нечіткою логікою.** Важливо зазначити, що запропонована методологія використовує дискретні стани (“+”, “-”, “0”) з чіткими пороговими значеннями, що відрізняється від традиційної нечіткої логіки. На відміну від нечіткої логіки,



яка оперує функціями належності та ступенями істинності в діапазоні  $[0,1]$ , запропонований підхід використовує чітке розмежування станів за допомогою порогових значень. Таке рішення було прийнято для спрощення практичної реалізації та зменшення обчислювальних вимог, зберігаючи при цьому основну перевагу якісного підходу – стійкість до шумів вимірювань та простоту інтерпретації результатів.

**Висновки.** У наш час цифрових технологій важливим питанням є забезпечення надійності роботи електронних пристроїв різного роду. Важливо не тільки розробляти пристрої таким чином, щоб вони могли слугувати довго, а й мати змогу автоматично прогнозувати відмову окремих компонентів пристрою та діагностувати дефекти у вже працюючому обладнанні. Як показав аналіз існуючих публікацій, для цього напрямку широкого застосування набуває використання цифрового двійника як еталонної моделі системи, з поведінкою якого порівнюється поведінка реального пристрою.

У цій статті була запропонована методологія діагностики апаратного забезпечення, яка базується на представленні вхідних та вихідних значень пристрою у вигляді векторів і формування таблиці відповідності відхилення виходів пристрою від еталонних до можливих причин, що призвели до цього відхилення (дефекту). Еталонні значення отримуються за допомогою використання інформаційної технології цифрового двійника. Дана методологія використовує якісний підхід, що надає переваги щодо простоти реалізації та низьких вимог до обчислювальних ресурсів, а отже, і ціни реалізації, хоча це в деяких випадках може призводити до зниження точності. Методологія працює з вхідними та вихідними значеннями пристрою без потреби фактичного вимірювання кожного компоненту пристрою, при цьому дозволяючи проаналізувати вплив даних компонентів по окремоті.

Важливим внеском роботи є систематизація підходів до генерації таблиць відповідності, які є центральним елементом запропонованої методології. Запропоновано три методи: систематичне моделювання несправностей для повного покриття простору станів, аналітичний вивід для простих схем з відомими математичними залежностями, та формалізацію експертних знань для складних систем. Гібридне поєднання цих методів із можливістю автоматизації процесу генерації спрощує і покращує можливість практичної реалізації методології для широкого спектра електронних пристроїв.

Дана робота відкриває низку можливостей для подальших досліджень і покращень, а саме:

1. Відстежування зміни поведінки виходів пристрою відносно еталонних значень, отриманих з цифрового двійника, що дозволить прогнозувати час до відмови й завчасно реагувати на деградацію.
2. Розширення методології так, що вона враховуватиме не тільки поодинокі відхилення вхідних значень, а і їх комбінації.
3. Використання технології машинного навчання для формування таблиць відповідності на основі накопичених даних, що може значно підвищити масштабованість і точність діагностики.
4. Інтеграція методології у вбудовані системи моніторингу та технічного обслуговування з використанням технології кордонних обчислень (Edge computing) для забезпечення автономної роботи в реальному часі.

Запропонована методологія може використовуватися для різних застосувань, найбільш визначним з яких є силова електроніка, але підходить і для інших галузей, де пристрій можна представити у вигляді набору вхідних і вихідних значень, а також є можливість вимірювати ці вихідні значення. Завдяки поєднанню простоти, ефективності й можливості подальшого вдосконалення, представлений підхід має потенціал стати основою для широкого впровадження в системах діагностики та прогнозування технічного стану електронних пристроїв.

### Заява про використання генеративного ШІ та технологій на основі ШІ у процесі написання тексту статті.

Під час написання цього матеріалу автори використовували:

1. Claude: для генерації коду мовою Python, який використовувався для генерації діаграм за допомогою бібліотеки PyChart.
2. ChatGPT з режимом пошуку мережею: для пошуку статей на схожу тематику у відкритих джерелах.

Після використання цих інструментів автори переглянули та відредагували зміст за потреби і взяли на себе повну відповідальність за зміст публікації.

### Список використаних джерел

1. Susinni, G., Rizzo, S. A., & Iannuzzo, F. (2021). Two Decades of Condition Monitoring Methods for Power Devices. *Electronics*, 10(6), 683. <https://doi.org/10.3390/electronics10060683>.
2. Yang, S., Xiang, D., Bryant, A., Mawby, P., Ran, L., & Tavner, P. (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>.
3. Liu, Y., Sangwongwanich, A., Zhang, Y., Ou, S., & Wang, H. (2024). A transferable deep learning network for IGBT open-circuit fault diagnosis in three-phase inverters. *У 2024 IEEE applied power electronics conference and exposition (APEC)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/apec48139.2024.10509151>.
4. 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>.
5. Bofill, J., Abisado, M., Villaverde, J., & Sampedro, G. A. (2023). Exploring digital twin-based fault monitoring: Challenges and opportunities. *Sensors*, 23(16), 7087. <https://doi.org/10.3390/s23167087>.
6. Liu, H., Xia, M., Williams, D., Sun, J., & Yan, H. (2022). Digital twin-driven machine condition monitoring: A literature review. *Journal of Sensors*, 2022, 1–13. <https://doi.org/10.1155/2022/6129995>.
7. Spro, O. C. (2020). *Digital twins: Condition-monitoring of power electronic converters*. SINTEF Energy Blog. <https://blog.sintef.com>.
8. Diz, S. d. L., López, R. M., Sánchez, F. J. R., Llerena, E. D., & Peña, E. J. B. (2023). A real-time digital twin approach on three-phase power converters applied to condition monitoring. *Applied Energy*, 334, 120606. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120606>.
9. Milton, M., De La O, C. A., Ginn, H. L., & Benigni, A. (2020). Controller-embeddable probabilistic real-time digital twins for power electronic converter diagnostics. *IEEE Transactions on Power Electronics*, PP(99), 1–1.
10. Murgia, A., Harsha, C., Tsiporkova, E., Nawghane, C., & Vandeveld, B. (2024). A hybrid model for prognostic and health management of electronic devices. *Electronics*, 13(3), 642. <https://doi.org/10.3390/electronics13030642>.
11. Inamdar, A., van Driel, W. D., & Zhang, G. (2024). Digital twin technology—a review and its application model for prognostics and health management of microelectronics. *Electronics*, 13(16), 3255. <https://doi.org/10.3390/electronics13163255>.
12. Bhoi, S. K., Chakraborty, S., Verbrugge, B., Helsen, S., Robyns, S., El Baghdadi, M., & Hegazy, O. (2024). Intelligent data-driven condition monitoring of power electronics systems using smart edge-cloud framework. *Internet of Things*, 26, 101158. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2024.101158>.

### References

1. Susinni, G., Rizzo, S. A., & Iannuzzo, F. (2021). Two Decades of Condition Monitoring Methods for Power Devices. *Electronics*, 10(6), 683. <https://doi.org/10.3390/electronics10060683>.
2. Yang, S., Xiang, D., Bryant, A., Mawby, P., Ran, L., & Tavner, P. (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>.

3. Liu, Y., Sangwongwanich, A., Zhang, Y., Ou, S., & Wang, H. (2024). A transferable deep learning network for IGBT open-circuit fault diagnosis in three-phase inverters. *У 2024 IEEE applied power electronics conference and exposition (APEC)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/apec48139.2024.10509151>.
4. 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/tpe.2020.3009600>.
5. Bofill, J., Abisado, M., Villaverde, J., & Sampedro, G. A. (2023). Exploring digital twin-based fault monitoring: Challenges and opportunities. *Sensors*, 23(16), 7087. <https://doi.org/10.3390/s23167087>.
6. Liu, H., Xia, M., Williams, D., Sun, J., & Yan, H. (2022). Digital twin-driven machine condition monitoring: A literature review. *Journal of Sensors*, 2022, 1–13. <https://doi.org/10.1155/2022/6129995>.
7. Spro, O. C. (2020). *Digital twins: Condition-monitoring of power electronic converters*. SINTEF Energy Blog. <https://blog.sintef.com>.
8. Diz, S. d. L., López, R. M., Sánchez, F. J. R., Llerena, E. D., & Peña, E. J. B. (2023). A real-time digital twin approach on three-phase power converters applied to condition monitoring. *Applied Energy*, 334, 120606. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120606>.
9. Milton, M., De La O, C. A., Ginn, H. L., & Benigni, A. (2020). Controller-embeddable probabilistic real-time digital twins for power electronic converter diagnostics. *IEEE Transactions on Power Electronics*, PP(99), 1–1.
10. Murgia, A., Harsha, C., Tsiporkova, E., Nawghane, C., & Vandeveld, B. (2024). A hybrid model for prognostic and health management of electronic devices. *Electronics*, 13(3), 642. <https://doi.org/10.3390/electronics13030642>.
11. Inamdar, A., van Driel, W. D., & Zhang, G. (2024). Digital twin technology—a review and its application model for prognostics and health management of microelectronics. *Electronics*, 13(16), 3255. <https://doi.org/10.3390/electronics13163255>.
12. Bhoi, S. K., Chakraborty, S., Verbrugge, B., Helsen, S., Robyns, S., El Baghdadi, M., & Hegazy, O. (2024). Intelligent data-driven condition monitoring of power electronics systems using smart edge-cloud framework. *Internet of Things*, 26, 101158. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2024.101158>.

Отримано 10.06.2025

UDC 004.942

**Vladyslav Baida<sup>1</sup>, Oleksandr Velihorskyi<sup>2</sup>**

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

**E-mail:** [Vladyslav.Baida@stu.cn.ua](mailto:Vladyslav.Baida@stu.cn.ua). **ORCID:** <http://orcid.org/0009-0004-2172-8057>

**Google Scholar:** <https://scholar.google.com/citations?user=J8RjmHwAAAAJ>

<sup>2</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Radio Engineering and Embedded Systems  
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

**E-mail:** [o.veligorskiy@stu.cn.ua](mailto:o.veligorskiy@stu.cn.ua). **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-8256-7339>

**Google Scholar:** <https://scholar.google.com.ua/citations?user=SWbfGzQAAAAJ>

**METHODOLOGY FOR HARDWARE DIAGNOSTICS USING  
AN INFORMATION TECHNOLOGY OF DIGITAL TWIN**

*This paper presents a novel methodology for diagnosing hardware systems based on the use of the digital twin by using a vector-based representation of both input and output values. The method involves comparing the output vector of a real electronic device with a corresponding reference vector derived from a mathematical model (digital twin). Deviations between these vectors are analyzed using a specially designed table of discrete qualitative correspondences, which enables identification of the likely causes of incorrect behavior in specific components without requiring intrusive measurements or additional sensors.*

*The approach models the behavior of an electronic system as a transformation from an input vector to an output vector, where each deviation in input causes a deterministic change in output. This vector-based abstraction allows for the construction of decision rules and classification zones using relative relationships between components rather than absolute values, making the system robust to noise, parasitic effects, and measurement uncertainties. The proposed method is computationally efficient, allowing deployment on low-power embedded platforms, and does not rely on deep physical modeling or extensive machine learning training datasets.*

*The methodology introduces the concept of a “gray zone” in the multidimensional output space, where small deviations are treated as acceptable tolerances, and only significant directional changes trigger diagnostic logic. Additionally, a normalization step and the introduction of threshold vectors allow for scalable precision and adaptation to non-linear dependencies in hardware behavior.*

*Advantages of this approach include simplicity of implementation, human readability of diagnostic outputs (e.g., “+”, “++”, “-”, “--”), low computational requirements, and high resilience in noisy or constrained environments. Moreover, the system enables real-time monitoring and provides a foundation for future extensions such as remaining useful life (RUL) prediction and adaptive table generation through machine learning.*

*The methodology is particularly suited for power electronics and embedded systems, but can be generalized to any application where the device can be abstracted as a system with measurable input/output behavior. This work provides a flexible, scalable, and interpretable diagnostic framework that relies on vector mappings within a model-based digital twin approach, enabling robust and low-cost fault detection without the need for high-precision measurements, extensive sensor networks, or machine learning.*

**Keywords:** digital twin, information technology, vectors, diagnosis, hardware, methodology, correspondence table.

*Fig.: 7. Table.: 3. References: 12.*