

Владислав Дмитрович Байда¹, Олександр Анатолійович Велігорський²

¹ аспірант кафедри інформаційних та комп'ютерних систем
Національного університету «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: Vladyslav.Baida@stu.cn.ua **ORCID:** 0009-0004-2172-8057

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

² професор кафедри електроніки, автоматики, робототехніки та мехатроніки
Національного університету «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: o.veligorskiy@stu.cn.ua **ORCID:** 0000-0002-8256-7339

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

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПАРАЗИТНИХ ПАРАМЕТРІВ МОДЕЛІ ПЕРЕТВОРЮВАЧА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ГЕНЕТИЧНИМ АЛГОРИТМОМ

У статті представлено уточнення паразитних параметрів математичної моделі перетворювача постійного струму шляхом застосування генетичного алгоритму, з метою подальшого створення високоточних цифрових двійників для діагностики обладнання силової електроніки. Запропоновано підхід до ідентифікації семи паразитних параметрів моделі перетворювача постійного струму, що знижує напругу, на основі експериментальних вимірювань струму через індуктивність та напруги на конденсаторі фільтру. Використання генетичного алгоритму з багатокритеріальною функцією пристосованості дозволило досягти симетричних відхилень паразитних параметрів моделі від реальних вимірних сигналів, що забезпечує можливість встановлення єдиного порогового значення для методології діагностики. Результати заповнюють прогалину у застосуванні генетичних алгоритмів для багатопараметричної оптимізації цифрових двійників силової електроніки.

Ключові слова: генетичний алгоритм; моделювання; кіберфізична система; апаратне забезпечення; цифровий двійник.

Рис.: 8. Табл.: 8. Бібл.: 37.

Актуальність теми дослідження. Сучасна силова електроніка переживає період технологічного розвитку, де перетворювачі постійного струму, які підвищують або знижують напругу відіграють критичну роль у системах енергозабезпечення від малопотужних зарядних пристроїв для портативної електроніки до систем живлення комплексів та центрів обробки даних з потужністю десятки кВт. Точність математичних моделей цих перетворювачів безпосередньо визначає ефективність діагностичних систем, прогнозування відмов та забезпечення безперебійної роботи обладнання. За даними дослідження 2024 року, компанії зі списку Fortune Global 500 щорічно втрачають \$1.4 трильйона через незаплановані простоя обладнання, що становить 11 % річного обороту та в більшості секторів економіки перевищує показники минулих років [0]. В автомобільній та важких промисловостях кожна година простою коштує, відповідно, вдвічі та вчетверо більше за аналогічний проміжок часу у 2019 році [0].

Простої обладнання дуже часто викликані поламаками обладнання. Відомі дослідження показують, що найбільш частими є відмови, пов'язані з алюмінієвими електролітичними конденсаторами (близько 50% відмов), а також напівпровідниковими приладами (IGBT, MOSFET – близько 34 % відмов) [**Помилка! Джерело посилання не знайдено.**]. Загальна частка поламок силових систем (інвертори та перетворювачі напруги), за результатами, наведеними в дослідженні [**Помилка! Джерело посилання не знайдено.**], доходить до 27% від усіх відмов у вітрових турбінах на суші, до 28 % – у сонячних фотоелектричних системах, та до 12 % – в електромобілях.

Для зменшення часу простою та упереджувальної заміни обладнання, що скоро може вийти з ладу, останніми роками значного розвитку набула концепція цифрових двійників для пристроїв силової електроніки. Цифровий двійник являє собою віртуальну репліку (програмну модель) фізичного пристрою, що оновлюється в реальному часі на основі даних з датчиків та дозволяє прогнозувати поведінку системи, виявляти аномалії та оцінювати стан та залишковий ресурс фізичних компонентів [4]. За оцінками [5], впровадження цифрових двійників також надає додаткові вигоди під час розробки нових продуктів: скорочення загального часу розробки на 20-50 %, зменшення кількості дорогих прототипів (часто з 2-3 до 1), а також зниження на 25 % проблем з якістю продукту при

запуску виробництва. Згідно з оцінками презентації [6] 2020 року, глобальний ринок цифрових двійників мав вирости з 3,8 млрд \$ до 35,8 млрд \$ до 2025 року із середньорічним темпом зростання 45,4 %, що підтверджує стратегічну важливість цієї технології для промисловості. Систематичне дослідження 167 публікацій [7] показало, що застосування цифрових двійників для прогностичного обслуговування та управління станом (Prognosis Health Monitoring) зросло експоненційно з 2018 року.

Якість та точність передбачення поведінки пристрою за допомогою цифрового двійника залежить виключно від точності вбудованої моделі, яка повинна максимально враховувати топологію, значення номіналів електричних елементів, а також їх паразитних параметрів. Варто відзначити, що паразитні параметри компонентів DC-DC перетворювачів, такі як еквівалентний послідовний опір (ESR) конденсаторів, опір обмотки індуктивності, паразитна індуктивність провідників, затримки перемикачів транзисторів та параметри діодів – суттєво впливають на точність моделювання динамічної поведінки перетворювачів та застосування цифрового двійника. Як зазначено в роботі [8], невраховані паразитні ефекти призводять до розходження між номінальними значеннями з документації та реальними параметрами на рівні 6-40 % для різних компонентів (наприклад, розбіжність у значеннях індуктивності складає близько 7 %, ємності малих конденсаторів – до 16 %, а опору обмотки індуктивності – до 40 %), що є неприйнятним для систем діагностики та раннього виявлення деградації компонентів. Таким чином, наукова, пов'язана з підвищенням точності ідентифікації параметрів моделей силових перетворювачів є надзвичайно актуальною, оскільки дозволяє створювати високоточні математичні та/або програмні моделі, здатні відстежувати деградацію компонентів у реальному часі у складі цифрових двійників.

Постановка проблеми. Центральною проблемою при створенні високоточних моделей (в тому числі цифрових двійників) перетворювачів постійної напруги є невизначеність паразитних параметрів компонентів. На відміну від номінальних значень індуктивності, ємності компонентів, які точно наводяться в документації від виробників, модель перетворювача може бути уточнена (наближена до реального пристрою) шляхом врахування додаткових параметрів, таких як опір обмотки для дроселів та трансформаторів (winding resistance), еквівалентного послідовного опору конденсаторів (ESR), опору відкритого каналу MOSFET транзисторів (R_{on}), падіння напруги на постійній прямій напруги діода, а також його опору у відкритому стані (VD та RD), а також енергії, що зберігається в паразитних ємностях та індуктивностях напівпровідникових приладів. Ці параметри мають складні залежності від умов експлуатації, для прикладу, опір відкритого каналу транзистора має позитивний температурний коефіцієнт, питомий опір міді збільшується з $1,724 \cdot 10^{-6} \text{ } \Omega \cdot \text{см}$ при кімнатній температурі всього до $2,3 \cdot 10^{-6} \text{ } \Omega \cdot \text{см}$ при $100 \text{ } ^\circ\text{C}$, а заряд зворотного відновлення діода (reverse recovery charge, Q_{rr}) залежить від прямого струму в відкритому стані та швидкості зміни струму під час вимикання діода. Інші параметри можуть варіюватися в широких межах, наприклад, падіння напруги на відкритому каналі IGBT транзистора становить від 2 до 4 В [9].

Для уточнення параметрів моделей перетворювачів можуть використовуватися традиційні підходи, однак вони мають суттєві обмеження. Ручне налаштування параметрів методом проб та помилок є надзвичайно трудомістким і неефективним для багатопараметричної задачі з великою кількістю невідомих параметрів. Навіть при використанні систематичних підходів, таких як покрокова зміна (parametric sweep) для ідентифікації ESR та ємності вихідного конденсатора, цей процес вимагає множинних ітерацій з розрахунком помилки на кожному кроці [8], при цьому немає гарантії знаходження глобального оптимуму для всього набору параметрів.

Вимірювальні методи ідентифікації паразитних параметрів, хоча й забезпечують високу точність для окремих компонентів, потребують спеціалізованого обладнання (RLC-метри, імпедансні аналізатори) та демонтажу компонентів з плати, що унеможливорює

онлайн-діагностику працюючої системи. Методи «білої скриньки» (white-box), запропоновані в роботі [8], дозволяють ідентифікувати параметри за ustalеними та перехідними характеристиками, однак потребують значної апріорної інформації про структуру системи та чутливі до шумів вимірювань.

Багатопараметрична оптимізація паразитних параметрів є складною задачею через кілька факторів. По-перше, простір пошуку має високу розмірність, оскільки типова модель перетворювача постійного струму включає 5-10 паразитних параметрів. По-друге, цільова функція (мінімізація відхилення між моделлю та вимірюваннями) може мати множину локальних мінімумів через нелінійні взаємодії параметрів. По-третє, деякі параметри корельовані: наприклад, ESR та ємність конденсатора спільно визначають пульсації вихідної напруги [10], що створює вироджені напрямки в просторі оптимізації. У дослідженні [11] показано, що алгоритми, що базуються на методі рою часток (particle swarm optimization, PSO) досягають глобального оптимуму лише у 65 % випадків при оптимізації параметрів цифрового двійника перетворювача постійного струму, що знижує напругу, що підкреслює необхідність дослідження альтернативних підходів.

Варто відзначити, що більшість існуючих підходів до параметричної оптимізації цифрових двійників таких перетворювачів переважно базуються на згаданому вище методі рою частинок (PSO). Автори роботи [12] застосували PSO для оцінки параметрів перетворювача, що знижує напругу в рамках концепції цифрового двійника, включаючи паразитний опір конденсатора R_C та опір відкритого каналу MOSFET R_{DSon} , використовуючи кластерний аналіз даних для моніторингу деградації компонентів при різних умовах експлуатації.

Важливим є питання автоматизованої оптимізації параметрів для цифрових двійників, призначених для діагностики обладнання. На відміну від задач проектування, де достатньо наближеної відповідності моделі та реальної системи, діагностичні застосування вимагають вищої точності відтворення сигналів для виявлення ранніх ознак деградації компонентів [13]. Автори роботи [14] відзначили, що похибка калібрування цифрового двійника перетворювача, що підвищує напругу понад 2% призводить до неможливості достовірного моніторингу стану електrolітичних конденсаторів.

Генетичні алгоритми (ГА) пропонують альтернативний підхід з кращими властивостями глобального пошуку завдяки механізмам кросовера та мутації, які забезпечують ефективне дослідження багатомодального простору рішень. Порівняльні дослідження [15] показали, що ГА забезпечує на 24,15 % краще зниження перерегулювання та на 99% краще скорочення часу перехідного процесу порівняно з PSO при налаштуванні контролерів силових перетворювачів. Попри ці переваги, застосування ГА саме для оптимізації паразитних параметрів цифрових двійників перетворювачів постійного струму, що підвищують чи знижують напругу з метою їх діагностики залишається практично недослідженим, що обумовлює необхідність даного дослідження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Генетичні алгоритми для оптимізації моделей DC-DC перетворювачів. Застосування генетичних алгоритмів у силовій електроніці охоплює широкий спектр задач оптимізації. Найбільш розповсюдженим напрямком є налаштування параметрів PID-регуляторів для перетворювачів постійного струму. У роботі [16] автори розробили ГА-оптимізовані PID-контролери для перетворювачів, що знижують напругу, порівнюючи чотири критерії якості: IAE (інтеграл абсолютної похибки), ITAE (інтеграл зваженої за часом абсолютної похибки), ISE (інтеграл квадратичної похибки) та ITSE (інтеграл зваженої за часом квадратичної похибки). Найкращі результати отримано з критерієм IAE: перерегулювання 4,17 %, час наростання 0,0000504 с та час встановлення 0,000538 с, що суттєво перевищує показники традиційних методів налаштування [16].

Для buck-boost перетворювачів генетична оптимізація PID-контролерів досліджена в роботі [17], де автори проаналізували як ustalені, так і перехідні режими роботи з мінімізацією IAE як цільової функції. Gill та співавтори [18] застосували ГА для оптимізації

надійності та питомої потужності 5 кВт синхронних перетворювачів, що підвищують напругу, використовуючи багатокритеріальний підхід з побудовою Парето-фронту для аналізу компромісів між середнім часом напрацювання на відмову (Mean Time Between Failures, MTBF) та об'ємною щільністю потужності.

Параметричний дизайн компонентів перетворювачів також є активним напрямком досліджень. У роботі [19] представлено ГА підхід заснований на методах штучного інтелекту щодо проектування синхронного перетворювача, що знижує напругу, що дозволив досягти ефективності 99,383 % (порівняно з 99,354 % для традиційного проектування), зниження пульсацій напруги до 0,168 % та зменшення об'єму на 26 % (з 7,716 см³ до 5,732 см³).

Для ідентифікації параметрів перетворювачів важливим є дослідження [8], у якому автори запропонували метод «білої скриньки» на основі дискретизованих диференціальних рівнянь. Цей підхід дозволив ідентифікувати параметри L , R_L , C , R_C та R_S як для перетворювачів, що знижують, так і підвищують напругу, використовуючи комбінацію усталених та перехідних режимів роботи. Хоча це дослідження не використовувало безпосередньо ГА, воно заклало методологічну основу для формування цільової функції багатопараметричної оптимізації.

Методи ідентифікації паразитних параметрів у силовій електроніці.

Оцінювання ESR конденсаторів є найбільш дослідженим напрямком через критичну роль цього параметра у прогнозуванні відмов електролітичних конденсаторів. В роботі [20] запропоновано онлайн метод оцінювання ESR вихідного конденсатора перетворювача, що підвищує напругу на основі аналізу пульсацій напруги з використанням вейвлет-перетворення для фільтрації шумів. Автори роботи [21] розширили цей підхід застосуванням стисненого зондування (compressed sensing) для зниження вимог до частоти дискретизації АЦП при збереженні точності оцінювання.

У [22] представлено два методи оцінювання ESR конденсаторів перетворювача, що знижує напругу, з похибкою 2-12 % в експериментальних умовах (або близько 1 % в ідеальних симуляційних умовах), придатні як для режиму безперервних струмів (CCM), так і для режиму переривчастих струмів (DCM).

Ідентифікація опору обмотки індуктивності (DCR – DC Resistance) та параметрів напівпровідникових ключових елементів є менш дослідженою областю. В роботі [23] запропоновано метод комутованого опору для одночасного оцінювання DCR індуктора, R_{DSon} транзистора та прямого падіння напруги діода, що може бути інтегровано із замкненим контуром керування. Робота [24] розвинула підхід онлайн моніторингу індуктивності перетворювача, що знижує напругу, без використання датчика струму, компенсуючи вплив ESR на точність оцінювання.

Для SiC MOSFET ключів було представлено неінвазивний метод оцінювання R_{DSon} з точністю ± 5 % без вимірювання струму навантаження, що є важливим для раннього виявлення деградації напівпровідників [25]. У роботі [26] запропонували метод на три кроки для ідентифікації паразитних параметрів високочастотного планарного трансформатора в перетворювачах на основі подвійних активних мостів (Dual Active Bridge, DAB) для електромобілів, який поєднує математичне моделювання на основі дуальності магнітних і електричних кіл з алгоритмом рекурсивних найменших квадратів із фактором забування (FFRLS) для ідентифікації. Метод забезпечує точність, порівнянну з вимірюванням імпедансним аналізатором та FEA-моделюванням, але є економнішим і швидшим, особливо для високочастотних застосувань, де флуктуації імпедансних характеристик ускладнюють визначення резонансних частот традиційними способами. Експериментальна верифікація на 4,4 кВт прототипі з робочою частотою 40 кГц підтвердила ефективність методу для врахування впливу паразитних ємностей, індуктивностей та опорів на характеристики перетворювача.

Комплексні методи ідентифікації множини параметрів використовують адаптивні фільтри Калмана та машинне навчання. Автори роботи [27] застосували нейронну мережу dendrite net для ідентифікації ємності, індуктивності та ESR при змінних входніх напругах. Physics-Informed Neural Network (PINN), представлена в [28], долає проблеми недостатньої робастності та потреби у великих обсягах навчальних даних (лише 360 зразків було використано для навчання) при оцінюванні параметрів силових перетворювачів, демонструючи стійкість до похибки дискретизації АЦП (12 біт), шуму та похибки синхронізації.

Метаевристичні алгоритми для оптимізації моделей перетворювачів.

Порівняльний аналіз різних метаевристичних алгоритмів для перетворювачів постійного струму представлений у кількох дослідженнях. У роботі [29] порівняно PSO, ГА та Grey Wolf Optimizer (GWO) для налаштування PID контролера перетворювача, що підвищує напругу, та встановлено, що GWO досягає на 50,89 % нижчої помилки у порівнянні з PSO та на 44,7 % порівняно з ГА. Це пояснюється меншою кількістю конфігураційних параметрів GWO та кращою здатністю уникати локальних оптимумів.

У роботі [30] було застосовано PSO з Extended Phase Shift (EPS) модуляцією для мінімізації струмового навантаження DAB перетворювачів. Запропонований метод IDAB-DMC знизив струмове навантаження з 5,52 А (звичайний EPS) до 5.05 А, що на 8.5% краще за традиційні підходи. Експериментальна верифікація також показала зменшення струмового навантаження з 9,76 А до 7,92 А, підтвердивши ефективність методу.

Також було розроблено PSO-оптимізацію двонаправлених перетворювачів постійного струму для електромобілів, досягнувши зниження загальних втрат потужності до 16,64 Вт. Оптимізація параметрів включала геометрію тороїдального індуктора, коефіцієнт заповнення ($d = 0,69$) та характеристики комутаційних елементів, що дозволило знизити загальні втрати до 16.64 Вт і досягнути ККД 93,05 % у порівнянні з 82 % до оптимізації [31].

Цифрові двійники перетворювачів з оптимізацією параметрів.

Концепція цифрових двійників для моніторингу стану перетворювачів постійного струму активно розвивається в наш час. У 2019 році дослідники з Ольборгського університету в Данії представили комплексну реалізацію цифрового двійника для перетворювачів постійного струму, яка відрізнялася покращеною точністю моделювання. На відміну від існуючих методів моніторингу стану на основі вимірювальних схем, що потребували додаткового апаратного забезпечення для кожного компонента окремо, а також від попередніх підходів, які були засновані на моделях (model-based), що моделювали лише силову частину та потребували доступу до контролера, запропонований підхід реалізував неінвазивний метод без додаткових апаратних засобів. У роботі [12] у 2021 році було розвинуто цей підхід для оцінювання показників здоров'я (State of Health) конденсаторів та MOSFET, застосовуючи PSO для калібрування параметрів.

Ключовим дослідженням, що демонструє потенціал генетичних алгоритмів для цифрових двійників, є робота [32]. Автори розробили самовдосконалюваний цифровий двійник багатофазного перетворювача, що підвищує напругу на основі SiC транзисторів, застосовуючи як PSO, так і ГА для багатоцільової оптимізації показників здоров'я компонентів. Дослідження встановило, що ГА демонструє кращу швидкість збіжності порівняно з PSO: середній час виконання для ГА становив 21.3 с проти 28.1 с для PSO при експериментальній валідації на 75-кВт чотирифазному прототипі з 1000 ітераціями. Важливо, що ГА забезпечив порівнянну або вищу точність оцінювання для більшості параметрів, демонструючи нижче стандартне відхилення для індуктивності (3.8 μH проти 4.2 μH) та опору індуктивності (3,2 $\text{m}\Omega$ проти 4,3 $\text{m}\Omega$), хоча й потребував більших обчислювальних ресурсів через зростання пам'яті з кожною ітерацією. Методологія включала розв'язання рівнянь простору станів методом Рунге-Кутта четвертого порядку та мінімізацію середньоквадратичної похибки між сигналами фізичної системи та цифрової моделі, досягаючи точності оцінювання до 98,6 % для ємності та 79,8 % для опору у ввімкненому стані.

У роботі [33] запропонували методологію моніторингу стану трифазних перетворювачів на основі концепції цифрового двійника, що не потребує додаткових апаратних схем чи калібрування сенсорів. Для оцінювання деградації параметрів вихідного LC фільтра автори використали послідовну комбінацію двох алгоритмів оптимізації: PSO для швидкого наближеного пошуку в дискретному просторі та ГА для точного уточнення рішення в околі знайдених PSO параметрів. Цифровий двійник був запущений у режимі реального часу на платформі межових обчислень (Xilinx Zynq-7000) паралельно з системою керування фізичним перетворювачем, що забезпечувало безперервний моніторинг індуктивності та ємностей з похибкою оцінювання нижче 2%. Експериментальна валідація на 100 кВА UPS системі з TNPC топологією підтвердила ефективність методу для виявлення одночасної деградації компонентів фільтра в різних режимах роботи (islanding та grid-connected).

У роботі [34] використано метод цифрового двійника для перетворювача, що підвищує напругу, з використанням реалізації цифрової комутаційної моделі на основі FPGA. Дискретизація математичної моделі виконана методом зворотного Ейлера з частотою вибірки 1 МГц, що забезпечило синхронне виконання фізичної системи та її цифрового двійника на одній керуючій платі. Для оцінювання параметрів компонентів (індуктивності L , ємності C , опорів R_{DSon} , R_L , R_C) застосовано алгоритм PSO, який мінімізує цільову функцію на основі різниці між вимірними та змодельованими сигналами струму індуктивності та вихідної напруги. Експериментальна верифікація показала збіжність PSO за 90 ітерацій (≈ 8 секунд), при цьому похибка оцінювання індуктивності та ємності відносно вимірювань імпедансним аналізатором не перевищила 1%, хоча для паразитних опорів R_L та R_C похибка сягала 11-19%.

Автори роботи [11] представили альтернативний підхід з використанням глибокої нейронної мережі (DNN) для побудови цифрового двійника перетворювача, що знижує напругу, який було оптимізовано алгоритмом Spider Monkey Optimization (SMO), який як було показано, досягає глобального оптимуму у 95% випадків порівняно з 65% для PSO. Запропонований гібридний SMO+DNN підхід потребує також на 33% менше ітерацій для збіжності та демонструє на 80% менше порушень параметричних обмежень та підвищує точність прогнозування часу до відмови. Для валідації використовувався як емпіричний датасет з низькопотужного прототипу під прискореним термічним циклюванням (24-83 °C), так і синтетичний датасет на 10 000 зразків. SMO-оптимізований профіль деградації (траєкторія зміни параметрів в часі) покращує характеристики перетворювача, зменшуючи пульсації вихідної напруги на 20-25% та пульсації струму індуктивності на 15-20% порівняно з PSO-оптимізацією.

У роботі [35] було розроблено імовірнісний цифровий двійник на основі Polynomial Chaos Expansion для діагностики силових перетворювачів. Підхід передбачає впровадження real-time стохастичних моделей безпосередньо у FPGA-контролері силових перетворювачів з можливістю виконання симуляцій з кроками інтегрування від 70 нс до 2 мкс залежно від топології та платформи. Автори запропонували розділення моделей за ієрархією управління (application та converter layers), що значно знижує обчислювальну складність порівняно з монолітними моделями. Тестування на платформі Hardware-in-the-Loop продемонструвало здатність системи виявляти відхилення параметрів компонентів за межі проєктних допусків, дисбаланс розподілу потужності між паралельними модулями та спотворені значення в каналах вимірювання струму в реальному часі. Результати показали можливість реалізації ймовірнісних цифрових двійників для підвищуючої та напівмостової топологій перетворювачів на сучасних FPGA платформах Xilinx Kintex-7 та Virtex Ultrascale Plus.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Аналіз літератури виявив, що генетичні алгоритми широко використовуються для оптимізації дизайну перетворювачів постійного струму, зокрема для вибору номінальних значень пасивних компонентів

та параметрів контролерів. Однак для ідентифікації паразитних параметрів існуючих систем переважно застосовують інші методи: PSO [12; 14; 32; 34], аналітичні підходи [8], або нейронні мережі. Лише декілька робіт застосовують генетичні алгоритми, причому виключно у комбінації з PSO [32; 33], а не як самостійний метод. Роботи, що використовують ГА як основний метод для ідентифікації паразитних параметрів моделей перетворювачів на основі експериментальних вимірювань, у відомій літературі відсутні. Водночас у роботі [32] експериментально підтверджено, що генетичні алгоритми демонструють кращу швидкість збіжності для певних класів оптимізаційних задач, що свідчить про потенціал подальшого дослідження підходів, що базуються на ГА. Запропоноване дослідження заповнює цю прогалину, отримані результати можуть бути використані для оптимізації моделі, у тому числі і для застосування її у складі цифрового двійника перетворювачів напруги постійного струму.

Існуючі методи ідентифікації паразитних параметрів зазвичай фокусуються на окремих елементах (переважно ESR конденсаторів [20; 21; 22]) та не розглядають задачу комплексної одночасної оптимізації множини параметрів (ESR, DCR, паразитні індуктивності, характеристики ключів та діодів) з метою мінімізації похибки цифрового двійника. Методи «білої скриньки» [8] забезпечують теоретичну основу для формулювання задачі, проте потребують ефективних алгоритмів глобальної оптимізації для практичної реалізації.

Порівняльні дослідження ГА та PSO для інших задач силових електроніки демонструють суперечливі результати щодо переваг кожного алгоритму. В роботі [29] показано кращу продуктивність PSO над ГА для налаштування PID-контролерів перетворювачів напруги. Водночас результати роботи [15] показують протилежний результат – ГА перевершив PSO за всіма метриками при оптимізації ковзного режиму керування. У комплексному порівнянні 28 алгоритмів [36] встановлено, що жоден метод не є універсально оптимальним. Ці суперечності свідчать про необхідність дослідження застосування ГА саме для багатопараметричної оптимізації паразитних параметрів у цифрових двійниках.

Не висвітленою залишається також методологія застосування ГА для ітеративного вдосконалення точності цифрового двійника на основі порівняння з реальними вимірюваннями. Існуючі роботи використовують оптимізацію переважно для початкового калібрування моделі, тоді як концепція самовдосконалюваного цифрового двійника з безперервною адаптацією параметрів потребує подальшого розвитку. Крім цього, також відсутні дослідження специфічних переваг та обмежень ГА порівняно з альтернативними алгоритмами (PSO, GWO, SMO) саме для задачі оптимізації паразитних параметрів моделей з метою діагностики обладнання.

Мета статті. Ключова новизна запропонованого дослідження полягає у розробці методології оптимізації паразитних параметрів математичних моделей перетворювачів постійного струму (що знижують та підвищують напругу) за допомогою генетичного алгоритму для підвищення точності цифрових двійників, що використовуються для діагностики апаратного забезпечення. Дослідження охоплює комплексну оптимізацію 7 параметрів (ESR конденсатора, паразитна індуктивність, опір обмотки індуктивності, затримки транзисторів, характеристики діода) на основі реальних вимірювань з обладнання, що є унікальним поєднанням підходів, не представленим у відомих публікаціях.

Практична значущість дослідження обумовлена необхідністю створення точного цифрового двійника для системи дистанційної лабораторії по роботі з апаратним забезпеченням (а саме перетворювача, що знижує напругу), що був розроблений в рамках проєкту Lab Discovery Engine (міжнародний субгрант проєкту NGI Search від програми Horizon Europe HORIZON-CL4-2021-HUMAN-01) без необхідності інвазивних вимірювань або виведення обладнання з експлуатації. Розроблена методологія може бути застосована для раннього виявлення деградації компонентів, прогнозованого технічного обслуговування та підвищення надійності критичних систем силових електроніки.

Результати даної роботи будуть надалі використані для впровадження цифрового двійника для методології діагностики апаратного забезпечення, яка була представлена у роботі [37].

Виклад основного матеріалу. 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. Ця розбіжність між моделлю і реальним пристроєм призводить до суттєвого зниження точності цифрового двійника. Отже, для кращих результатів модель має включати в себе паразитні параметри, наприклад такі, як: опір котушки індуктивності (DCR) R_L , еквівалентний послідовний опір конденсатора (ESR) R_C , паразитна індуктивність конденсатора L_C тощо (рис. 2). Також слід враховувати неідеальність поведінки електронних компонентів, наприклад затримки на перемикання транзистора. Основні параметри експериментального макета перетворювача, а також початкові значення паразитних параметрів, що приймалися на початку дослідження, наведено в табл. 1.

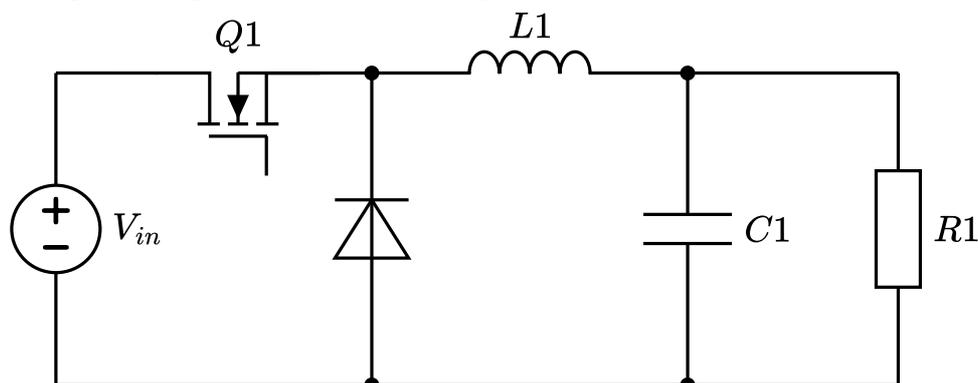


Рис. 1. Типова схема понижувального перетворювача напруги

Джерело: розроблено авторами.

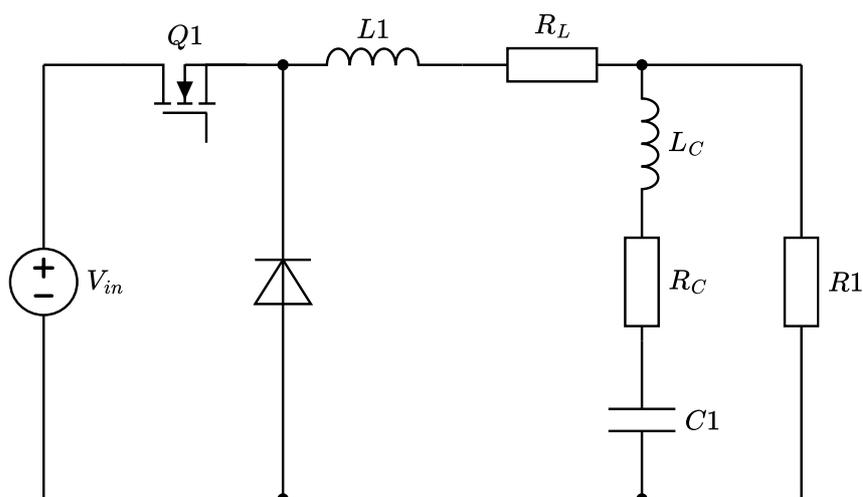


Рис. 2. Розширена схема електрична принципова перетворювача з деякими паразитними елементами

Джерело: розроблено авторами.

Таблиця 1 – Параметри експериментального перетворювача постійного струму, що знижує напругу та початкові значення паразитних параметрів

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

Джерело: розроблено авторами

Загалом, методика оптимізації паразитних параметрів, яку було використано в роботі, складається з наступних етапів:

1. Збір експериментальних даних.
2. Попередня обробка даних: фільтрація шумів та статистичний аналіз отриманих вимірювань для визначення діапазонів ключових показників (середні значення та пульсації напруги та струму).
3. Ідентифікація цільового сигналу: визначення вимірювання, яке є рівновіддаленим (наскільки це можливо) від екстремальних значень показників. Цей сигнал слугуватиме еталоном для оптимізації.
4. Оптимізація генетичним алгоритмом.
5. Перевірка оптимізованої моделі.

Початковий збір даних.

Методика початкового збору даних полягала у наступному. На експериментальному макеті перетворювача (параметри елементів та режим роботи наведено у таблиці 1), за допомогою цифрового осцилографа, протягом 4 годин з періодом 2 секунди робилися вибірки даних – напруги на ємності $C1$ (V_C) та напруга на виході перетворювача струм-напруга для вимірювання струму індуктивності $L1$ (I_L). Дані вибірки зберігалися на сервері для забезпечення до них доступу скриптами обробки. Загалом вибірка налічувала 6705 пар даних.

Попередня обробка даних.

На основі цих даних за допомогою мови програмування Python виконувався початковий аналіз поведінки схеми, а саме – пошук середніх значень напруги та струму, пульсацій напруги та струму, статистичні значення щодо діапазонів цих параметрів (наприклад значення найбільшої і найменшої пульсації напруги). Результати цього аналізу також будуть використані для визначення параметра θ для реалізації методології, що описана в [Помилка! Джерело посилання не знайдено.].

Приклад сигналів, які були обрані випадковим чином серед усього набору даних, зображено на рис. 3, де показані два періоди сигналів керування силовим транзистором. З рис. 3 видно, що сигнали мають значний шум (що пов'язано з реалізацією перетворювача, який використовується для проведення лабораторних робіт), а також в момент комутації струм має помітні викиди, що пов'язані зі значною паразитною індуктивністю контуру перемикання струму.

Оскільки показниками, які будуть використовуватися як вихідний вектор для методології, що описана в [37] є середня напруга на виході (вихідному конденсаторі фільтра) V_{Cavg} , пульсації напруги на виході (вихідному конденсаторі фільтра) $V_{Cripple}$, середній

струм через індуктивність I_{Lavg} , та пульсації струму через індуктивність $I_{Lripple}$, то доцільно проаналізувати діапазон значень цих показників. Вибірки, відсортовані по рівню від найменшого до найбільшого, показані на рис. 4.

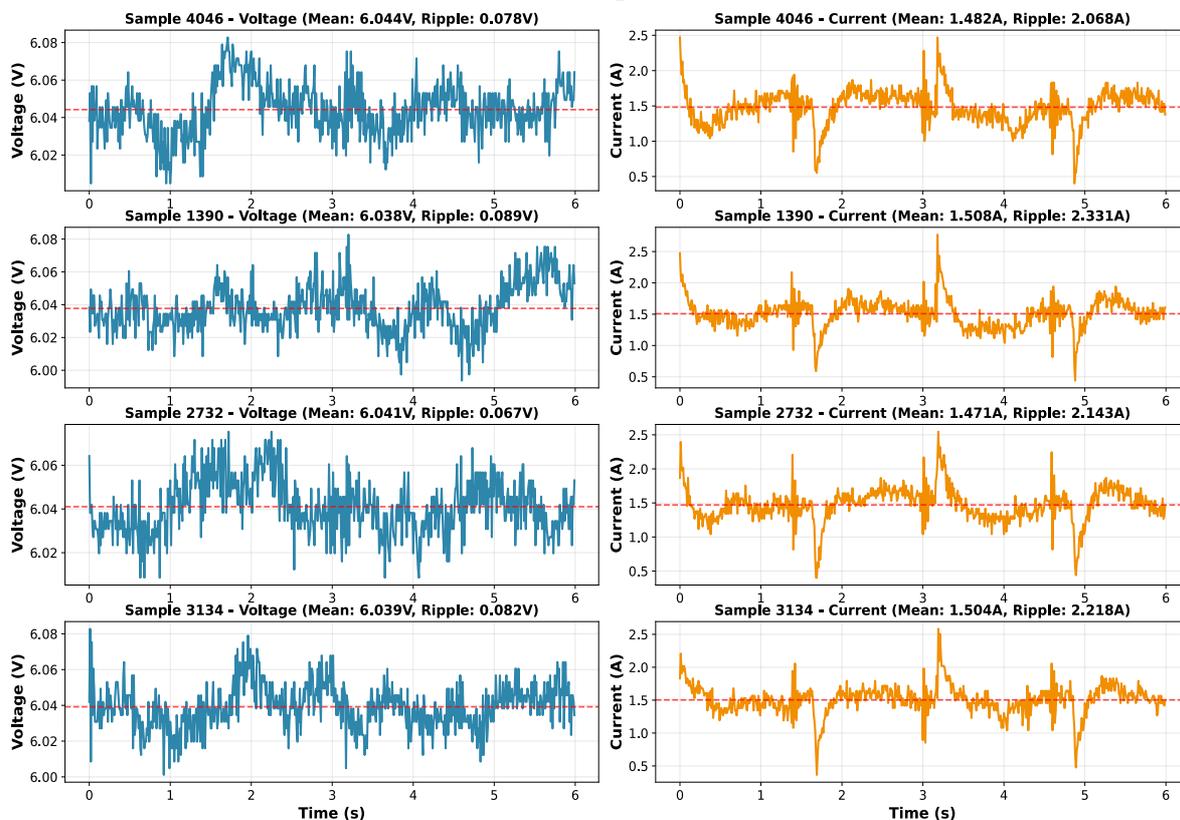


Рис. 3. Приклад сигналів з вибірки – напруга V_C та струм I_L

Джерело: розроблено авторами.

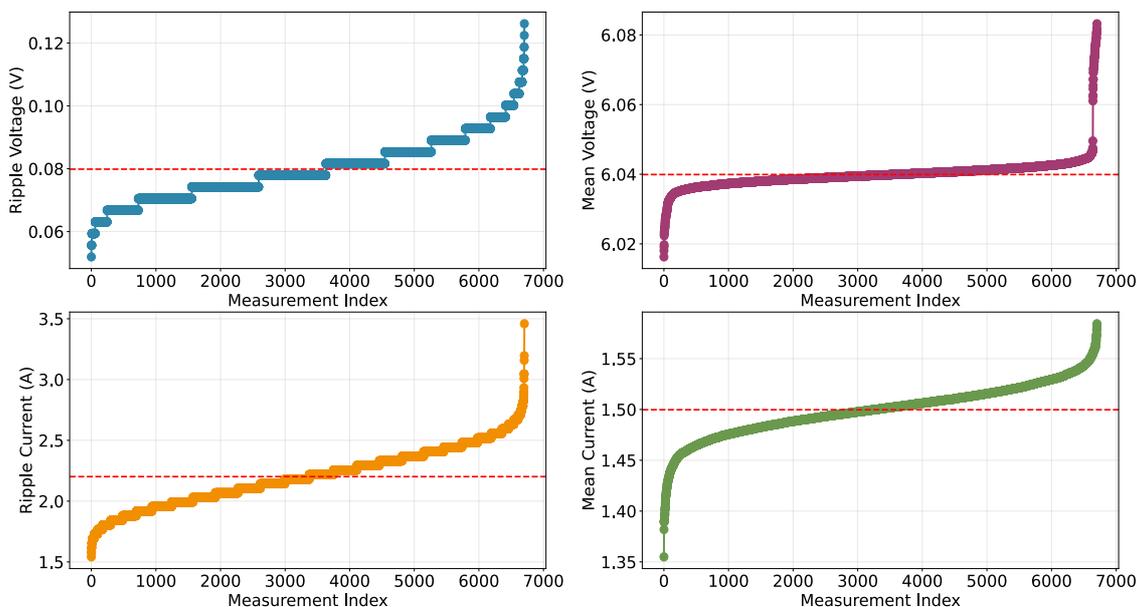


Рис. 4. Графічне зображення діапазонів чотирьох показників $V_{Cripple}$, V_{Cavg} , $I_{Lripple}$, I_{Lavg} у наявній вибірці сигналів

Джерело: розроблено авторами.

Статистика з отриманими значеннями вибірок відображена в табл. 2.

Таблиця 2 – Статистичні дані чотирьох показників

Показник	Мінімум	Максимум	Середнє	Медіана	Різниця макс.-мін., абс.	Різниця макс.-мін., %
Пульсації на- пруги $V_{Cripple}$	0,052 В	0,126 В	0,080 В	0,079 В	0,074 В	142,86
Середня на- пруга V_{Cavg}	6,016 В	6,083 В	6,040 В	6,040 В	0,067 В	1,11
Пульсації струму $I_{Lripple}$	1,542 А	3,459 А	2,202 А	2,181 А	1,917 А	124,39
Середній струм I_{Lavg}	1,355 А	1,584 А	1,500 А	1,501 А	0,229 А	16,93

Джерело: розроблено авторами.

Статистичний аналіз наявних сигналів демонструє розподіл, за формою близький до нормального. Графік розподілу, а також коробковий графік зображено на рис. 5, а в табл. 3 зображено дані щодо розподілу в числовому вигляді.

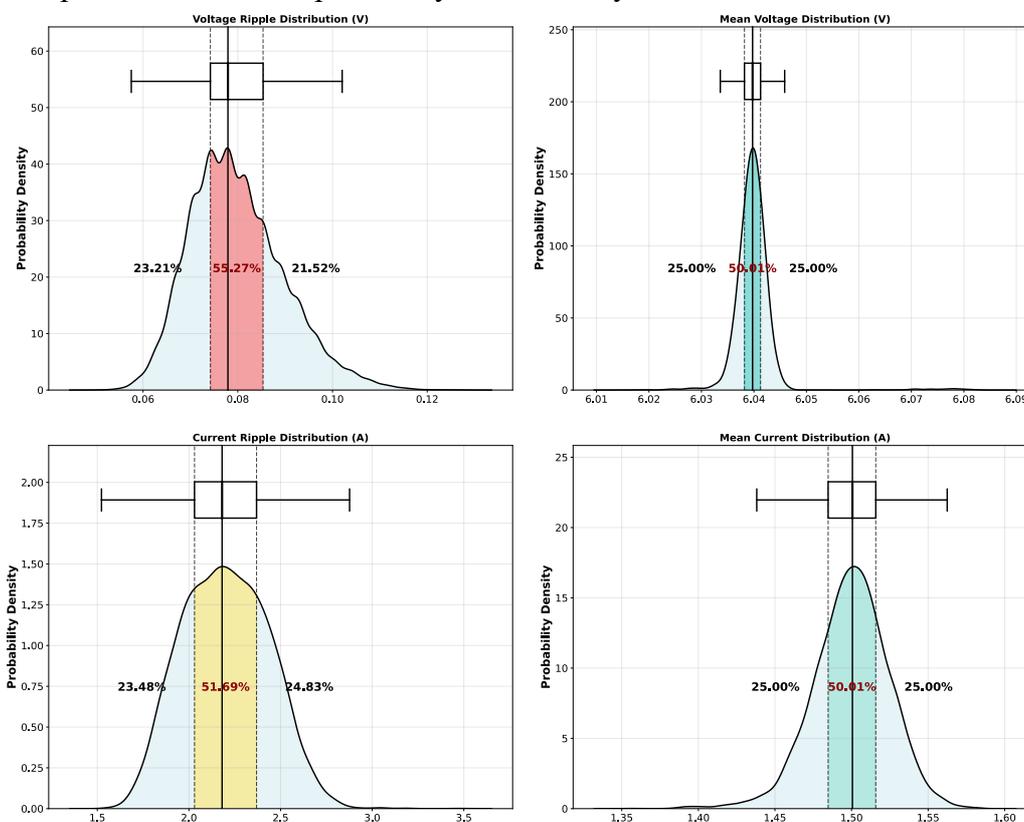


Рис. 5. Графічне зображення розподілу значень чотирьох показників $V_{Cripple}$, V_{Cavg} , $I_{Lripple}$, I_{Lavg} у наявній вибірці сигналів

Джерело: розроблено авторами.

Таблиця 3 – Дані розподілу чотирьох показників

Показник	Q1	Q3	IQR	Відсоток відліків в межах IQR, %	Відсоток відліків менших за Q1, %	Відсоток відліків більших за Q3, %
Пульсації напруги $V_{Cripple}$	0,074 В	0,085 В	0,011 В	55,27	23,21	21,52
Середня напруга V_{Cavg}	6,038 В	6,041 В	0,003 В	50,01	25,00	25,00
Пульсації струму $I_{Lripple}$	2,030 А	2,369 А	0,338 А	51,69	23,48	24,83
Середній струм I_{Lavg}	1,484 А	1,516 А	0,031 А	50,01	25,00	25,00

Джерело: розроблено авторами.

Як можна бачити з наведених вище таблиці, співвідношення між мінімальним і максимальним значеннями пульсацій напруги та пульсацій струму є досить високими (вище за 100 %), що обумовлено високим рівнем шумів та зазначеними вище проблемами зі схемою вимірювання. Дані умови є чудовими для тестування описаної в [37] методології, оскільки дозволяють перевірити коректність її роботи на обладнанні, яке використовується в лабораторних роботах, так є неідеальним. Оскільки методологія працює з пороговим значенням θ , яке саме по собі є відносною величиною, то зниження співвідношення розбіжностей максимального і мінімального значення показників є важливим для забезпечення більшої точності й надійності роботи алгоритму.

З таблиці 2 також видно, що пульсації струму, при великій відсотковій різниці між максимальним та мінімальним значеннями, мають велике медіанне значення (2.181 А), що призводить до високої абсолютної різниці між максимальним і мінімальним значеннями пульсацій струму: $\sim 1,917$ А. Оскільки основною з проблем є висока зашумленість сигналів, то доцільним є накладання фільтра, такого як фільтр ковзного середнього. Експериментальним шляхом було визначено ширину вікна фільтра струму в 17 відліків. З таблиці 2 видно, що хоча пульсації напруги й мають велику розбіжність, у порівнянні зі значеннями середньої напруги вони є досить малими, що призвело до рішення фільтрувати тільки сигнали струму I_L , а не напруги V_C .

На рис. 6 зображено відсортовані значення чотирьох показників, які були отримані після накладання описаного вище фільтра на всі сигнали з набору даних. Візуально можна бачити, що діапазон значень був змінений. Числові значення наведені в табл. 3. З порівняння таблиць видно, що значення пульсацій напруги та середньої напруги не змінилися, що є очевидним, оскільки фільтрація не була використана до сигналів напруг. Помітно, що відсоткова різниця між максимальним і мінімальним значеннями пульсацій струму виросла з 124,39 до 150 %, але водночас абсолютна різниця між максимумом та мінімумом знизилася з 1,918 до 0,677 А, що дорівнює зниженню приблизно у 2,83 раза. Таке суттєве зниження розкиду пульсацій свідчить про вдалий результат фільтрації, що матиме позитивний вплив на результати роботи методології.

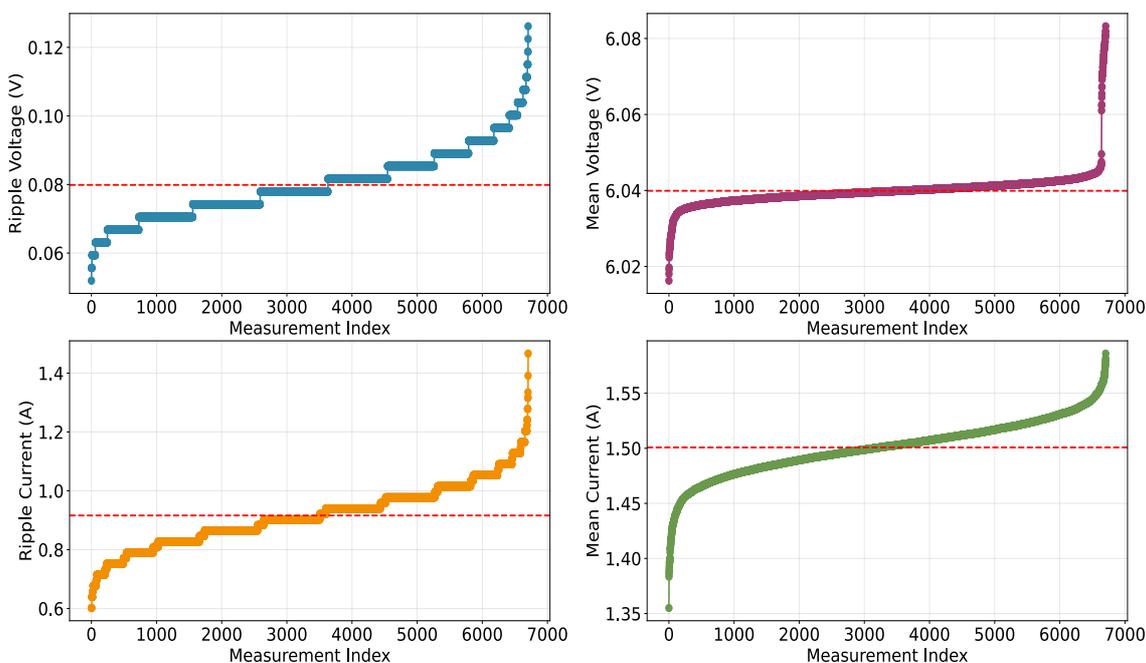


Рис. 5. Графічне зображення діапазонів чотирьох показників $V_{Cripple}$, V_{Cavg} , $I_{Lripple}$, I_{Lavg} у наявній вибірці сигналів після фільтрації струму

Джерело: розроблено авторами.

Таблиця 4 – Статистичні дані чотирьох показників після фільтрації

Показник	Мінімум	Максимум	Середнє значення	Медіана	Різниця максимум-мінімум	Відсоткова різниця максимум-мінімум, %
Пульсації напруги $V_{Cripple}$	0,0519 В	0,126 В	0,080 В	0,078 В	0,074 А	142,86
Середня напруга V_{Cavg}	6,016 В	6,083 В	6,040 В	6,040 В	0,067 В	1,11
Пульсації струму $I_{Lripple}$	0,451 А	1,128 А	0,722 А	0,714 А	0,677 А	150,00
Середній струм I_{Lavg}	1,350 А	1,585 А	1,500 А	1,501 А	0,235 А	17,43

Джерело: розроблено авторами.

Оптимізація моделі та визначення θ . Дана реалізація методології базується на порівнянні реальних сигналів з програмною моделлю. Хоча деякі з параметрів моделі відомі (наприклад, опір навантаження, індуктивність дроселя і так далі), інші залишаються невідомими, бо залежать не від підібраних компонентів, а є паразитними параметрами, що залежать як від монтажу плати, так і від паразитних параметрів самих елементів. Наприклад, одним з таких параметрів є паразитна індуктивність конденсатора.

Постає необхідність дати формальне визначення тому, що являється оптимальною моделлю для подальшого виконання самої оптимізації. Оскільки задля спрощення роботи з методологією, як описано в [37] варто визначати однакове значення θ , як для позитивних відхилень поведінки реального пристрою від математичної моделі, так і для негативних відхилень, то ідеально оптимізована модель має давати значення, що знаходяться “по середині”, іншими словами потрібно, щоб різниця по кожному з чотирьох показників (середня напруга, пульсація напруги, середній струм, пульсація струму) між максимальним значенням і значенням моделі приблизно дорівнювала різниці між значенням моделі й мінімальним значенням. Таким чином, модель буде знаходитися “по центру” всього можливого діапазону значень, а отже спільне значення для позитивних і негативних відхилень θ може бути використане.

Важливо зазначити, що шуми мають випадковий характер, неможливо гарантовано визначити точне порогове значення θ , оскільки навіть при досить тривалому зборі даних нема гарантії, що пізніше не виникне такий шум, що перевищить це порогове значення. Через цю проблему доцільно або збільшити значення θ на певний відсоток (взяти запас), або запускати алгоритм більш ніж один раз. Детальніше про це буде сказано далі.

З рис. 6 можна бачити, що розподіл значень показників не є рівномірним, тому задля знаходження “центрального” вимірювання, по якому буде оптимізуватися модель, доцільно використати формулу розрахунку «midpoint» (середини відрізка) по відфільтрованих значеннях, а саме:

$$X_{midpoint} = \frac{x_{min} + x_{max}}{2}, \quad (1)$$

де X – це один з чотирьох показників;

x_{min} – це мінімальне значення показника;

x_{max} – максимальне значення.

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

Для спрощення розрахунків пошук «midpoint» виконувався лише по двом з чотирьох показників: пульсаціям напруги та пульсаціям струму. Вибір саме цих двох показників пов'язаний з тим, що, як можна бачити з табл. 2, 3 та 4, ці показники мають набагато більшу дисперсію у порівнянні із середніми значеннями.

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

$$dist(X) = \left(\frac{X_i - X_{midpoint}}{std(X)} \right)^2, \tag{2}$$

де X_i - значення і-го сигналу (з набору даних);

$std(X)$ - стандартне відхилення серед усіх сигналів в наборі даних.

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

На рис. 7, а зображено наявні в наборі даних співвідношення пульсацій струму та напруги, а також виділено відповідне вимірювання, яке має мінімальну “відстань” (у цього випадку 0) до «midpoint», а на рис. 7, б – відсортовані значення відстаней.

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

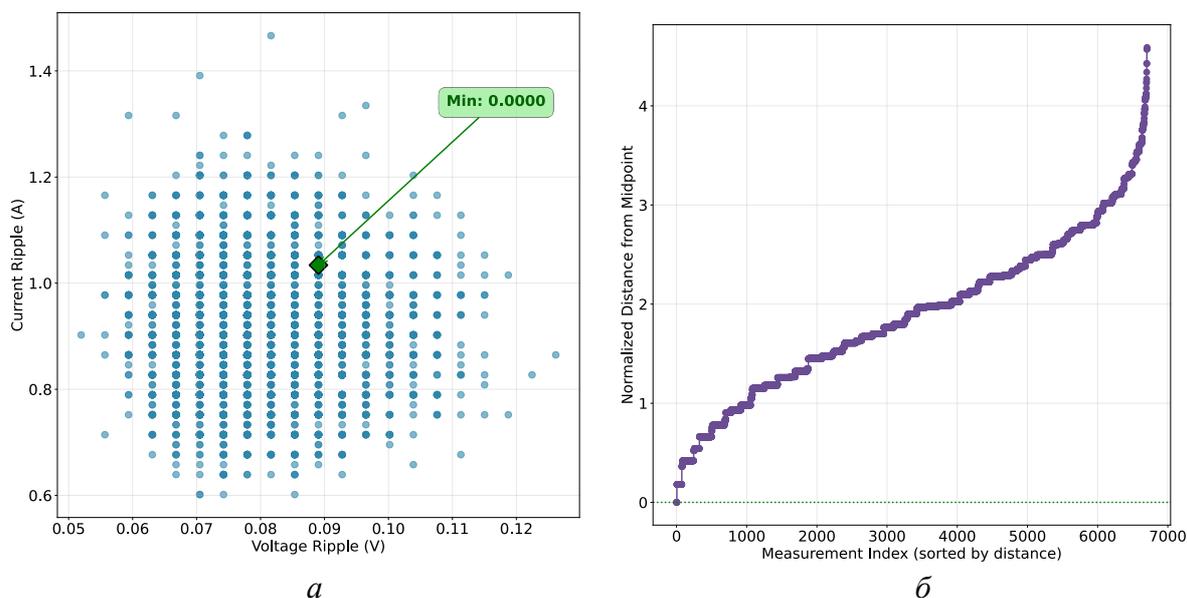


Рис. 6. Співвідношення між пульсаціями напруги і струму (а), нормалізовані відстані до midpoint (б)

Джерело: розроблено авторами.

Таблиця 5 містить перелік параметрів, які підбираються генетичним алгоритмом. Шість з семи параметрів кодуються в логарифмічній шкалі через великий діапазон значень (декілька порядків). Це забезпечує рівномірне дослідження параметрів у всьому діапазоні значень генетичним алгоритмом.

Таблиця 5 – Використані значення параметрів для оптимізації генетичним алгоритмом

Параметр	Початкове значення	Від	До	Шкала
Час наростання струму затвору транзистора, t_{Gr}	1 нс	0,1 нс	100 нс	Логарифмічна
Час спаду струму затвору транзистора, t_{Gf}	1 нс	0,1 нс	100 нс	Логарифмічна
Опір каналу транзистора, R_{DSon}	1 нОм	1 пОм	1 мОм	Логарифмічна
Опір діода R_D	100 мкОм	1 мкОм	0,1 Ом	Логарифмічна
Струм насичення діода I_S	1 mA	1e-16 A	1e-10 A	Логарифмічна
Опір конденсатора, R_C	0.05 Ом	1 мОм	0,5 Ом	Лінійна
Індуктивність конденсатора, L_C	1 нГн	1 пГн	100 нГн	Логарифмічна

Джерело: розроблено авторами.

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

Логарифмічна шкала:

$$value = 10^{\log_{10}(f_0)(min)+g*(\log(\max)-\log_{10}(f_0)(min))} \quad (3)$$

Лінійна шкала:

$$value = \log(\min)+g*(\log(\max)-\log_{10}(f_0)(min)), \quad (4)$$

де $value$ це кінцеве значення параметра, g – значення гена, \max – значення параметра «до» з табл. 5, \min – значення параметру «від» з табл. 5.

Функція пристосованості (fitness function) має такий вигляд:

$$fitness=w_{Vrip}*\Delta Vrip^2+w_{Vavg}*\Delta Vavg^2+w_{Irip}*\Delta Irip^2+w_{Iavg}*\Delta Iavg^2, \quad (5)$$

де відповідні w є ваговими коефіцієнтами.

Ця функція враховує квадрат різниці кожного показника реального сигналу (з фільтрацією для струму) з модельованим сигналом, помножений на відповідний ваговий коефіцієнт. Наявність квадрата “штрафує” однаковим чином як позитивне, так і негативне відхилення. Наявність ваг дозволяє коректувати алгоритм таким чином, щоб він більше акцентував увагу на конкретному параметрі. Аналогічно до вибору пульсацій як більш важливих значень для розрахунку «midpoint», як було зазначено вище, у цій функції пристосованості також більше приділяється уваги значенням пульсацій. Використані для оптимізації ваги мають наступні значення, сума яких дорівнює 1, як зазначено в табл. 6.

Таблиця 6 – Вагові коефіцієнти

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

Джерело: розроблено авторами.

Цей генетичний алгоритм був запущений для 100 поколінь з розміром покоління в 50 одиниць. Результати виконання алгоритму наведено в табл. 7, і є близькими до оптимальних значення невідомих параметрів моделі.

Таблиця 7 – Вагові коефіцієнти

Параметр	Початкове значення	Оптимізоване значення
Час наростання струму затвора транзистора, t_{Gf}	1 нс	0,1007 нс
Час спаду струму затвора транзистора, t_{Gf}	1 нс	82,65 нс
Опір каналу транзистора, R_{DSon}	1 нОм	3,316 пОм
Опір діода R_D	100 мкОм	1 мкОм
Струм насичення діода I_S	1 МА	2,423e-15 А
Опір конденсатора, R_C	0.05 Ом	0,0878 Ом
Індуктивність конденсатора, L_C	1 нГн	0,322 нГн

Джерело: розроблено авторами.

Для перевірки того, наскільки отримані генетичним алгоритмом значення насправді є оптимальними, треба визначити статистику щодо співвідношення значень сигналів програмної моделі (зі встановленими оптимізованими значеннями) з реальними сигналами. Це доцільно зробити на вже існуючих, зібраних на проміжку часу приблизно в 4 години, даних. На рис. 8 зображено графіки відхилень:

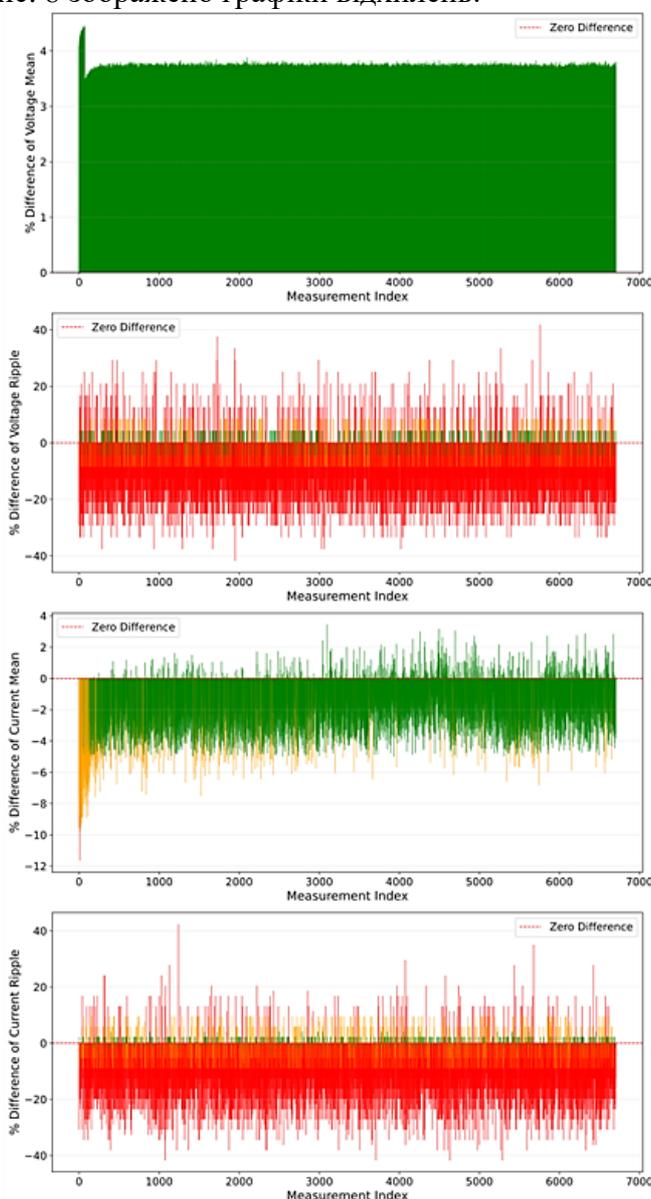


Рис. 7. Графіки відхилень поведінки оптимізованої моделі перетворювача від кожного з наявних у вибірці сигналів у відсотковому співвідношенні
Джерело: розроблено авторами.

Статистичні дані щодо відхилень різних реальних сигналів від модельованого сигналу з використанням оптимізованих значень моделі наведено в таблиці 8.

Таблиця 8 – Вагові коефіцієнти

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

Джерело: розроблено авторами

З табл. 8 та рис. 8 видно, що оптимізація моделі для отримання midpoint'у по пульсаціям напруги та струму була виконана цілком успішно, оскільки мінімальні та максимальні відхилення цих показників є приблизно рівними: -41,66 % та 41,69 % для пульсацій напруги, а також -41,64 % та 42,25 % для пульсацій струму відповідно. Цей факт дозволяє з легкістю встановити значення θ для кожного з чотирьох параметрів. Як значення обирається найбільше за модулем серед мінімального, так максимального відхилень.

Висновки. Застосування генетичного алгоритму для оптимізації паразитних параметрів математичної моделі перетворювача постійного струму, що знижує напругу, продемонструвало практичну ефективність підходу. Оптимізація семи параметрів (затримки транзистора, опори діода та транзистора у відкритому стані, струму насичення діода, ESR та паразитної індуктивності конденсатора) на основі 6705 експериментальних вимірювань дозволила досягти симетричних відхилень моделі від реальних сигналів: $\pm 41,69$ % для пульсацій напруги та $\pm 42,25$ % для пульсацій струму. Це забезпечує можливість встановлення єдиного порогового значення θ для позитивних та негативних відхилень у методології діагностики апаратного забезпечення, запропонованій у роботі [37].

Розроблена методологія ідентифікації паразитних параметрів через пошук «midpoint» та використання багатокритеріальної функції пристосованості з ваговими коефіцієнтами (0,35 для середньої напруги, 0,3 для пульсацій напруги, 0,2 для середнього струму, 0,15 для пульсацій струму) дозволяє створювати високоточні цифрові двійники без інвазивних вимірювань або виведення обладнання з експлуатації. Застосування фільтрації ковзного середнього (вікно 17 відліків) знизило абсолютну різницю пульсацій струму у 2.83 рази, що суттєво покращує надійність діагностики.

Результати дослідження заповнюють прогалину у застосуванні генетичних алгоритмів для багатопараметричної оптимізації паразитних параметрів перетворювачів постійного струму, що раніше переважно виконувалось методами PSO. Розроблений підхід може бути розширений на топологію, що підвищує напругу та інші типи перетворювачів, а також інтегрований у системи прогностичного обслуговування для раннього виявлення деградації компонентів у критичних застосуваннях силової електроніки.

Впровадження точних цифрових двійників на основі запропонованої методології має потенціал суттєво знизити економічні втрати від незапланованих простоїв обладнання через забезпечення можливості моніторингу стану компонентів у реальному часі та перехід від реактивного до проактивного технічного обслуговування.

Список використаних джерел

1. Siemens AG. (2024). *The true cost of downtime 2024: Fortune Global 500 analysis* (Siemens/Senseye). Siemens AG.
2. Yang, S., Bryant, A., Mawby, P., Xiang, D., Ran, L., & Tavner, P. (2011). An industry-based survey of reliability in power electronic converters. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 47(3), 1441–1451. <https://doi.org/10.1109/TIA.2011.2124436>.

3. 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, 631. <https://doi.org/10.3390/machines12090631>
4. Lei, Z., Zhou, H., Dai, X., *et al.* (2023). Digital twin based monitoring and control for DC–DC converters. *Nature Communications*, 14, Article 5604. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-41248-z>.
5. McKinsey & Company. (2022). *Digital twins: The key to smart product development*. McKinsey Digital.
6. MarketsandMarkets. (2020). *Digital twin market: Global forecast to 2025*. Market Research Report.
7. Xiao, B., Zhong, J., Bao, X., *et al.* (2024). Digital twin-driven prognostics and health management for industrial assets. *Scientific Reports*, 14, Article 13443. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-63990-0>.
8. 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, 393. <https://doi.org/10.3390/electronics7120393>.
9. Erickson, R. W., & Maksimović, D. (2020). *Fundamentals of power electronics* (3rd ed.). Springer.
10. Yao, K., Tang, W., Hu, W., & Lyu, J. (2015). A current-sensorless online ESR and C identification method for output capacitor of buck converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30(12), 6993–7005. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2406335>.
11. Mahmud, T., & Santos Jr., E. C. D. (2025). *DNN-based digital twin framework of a DC–DC buck converter using spider monkey optimization algorithm* (arXiv:2509.06279). arXiv. <https://arxiv.org/abs/2509.06279>.
12. 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.2020.3018420>.
13. Milton, M., de la O, C., Ginn, H., & Benigni, A. (2020). Controller-embeddable probabilistic real-time digital twins for power electronic converter diagnostics. *IEEE Transactions on Power Electronics*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2020.2971775>.
14. Di Nezio, G., Benedetto, M., Lidozzi, A., & Solero, L. (2023). DC–DC boost converters parameters estimation based on digital twin. *IEEE Transactions on Industry Applications*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1109/TIA.2023.3286832>.
15. Ortiz-Castrillón, J. R., Saldarriaga-Zuluaga, S. D., Muñoz-Galeano, N., *et al.* (2023). Optimal sliding-mode control of semi-bridgeless boost converters considering power factor corrections. *Energies*, 16(17), 6282. <https://doi.org/10.3390/en16176282>.
16. Nishat, M. M., Faisal, F., Evan, A. J., Rahaman, M. M., Sifat, M. S., & Rabbi, H. M. F. (2020). Development of genetic algorithm (GA) based optimized PID controller for stability analysis of DC–DC buck converter. *Journal of Power and Energy Engineering*, 8(9), 8–19.
17. *Steady state and transient state analysis of buck–boost converter with genetic algorithm optimized PID controller*. (2023). In *Proceedings of an IEEE conference*. <https://doi.org/10.1109/document/10084253>.
18. Gill, L., Neely, J. C., Rashkin, L. J., Flicker, J. D., & Kaplar, R. (2020). Co-optimization of boost converter reliability and volumetric power density using genetic algorithm. In *Proceedings of the IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)* (pp. 1–7). IEEE.
19. *Buck converter parameters design using artificial intelligence-based genetic algorithm*. (2024). In *Proceedings of an IEEE conference*. <https://doi.org/10.1109/document/10808195>.
20. Ren, L., & Gong, C. (2019). An online ESR estimation method for output capacitor of boost converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34(10), 10153–10165. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2889462>.
21. *ESR estimation for aluminum electrolytic capacitor of power electronic converter based on compressed sensing and wavelet transform*. (2021). *IEEE Transactions on Power Electronics*.
22. *ESR estimation schemes of output capacitor for buck converter from capacitor perspective*. (2020). *Electronics*, 9(10), Article 1596. <https://doi.org/10.3390/electronics9101596>.
23. *Switched-resistance method for inductor DCR and switch parameter estimation of DC–DC converter*. (2023). *IEEE Transactions on Power Electronics*.

24. *Online inductance monitoring based on dynamic characteristics and ESR effect compensation for buck converter without current sensor.* (2024). *IEEE Transactions on Power Electronics*.
25. *An approach for online estimation of on-state resistance in SiC MOSFETs without current measurement.* (2023). *IEEE Transactions on Power Electronics*.
26. Tuluhong, A., Wang, W., Li, Y., Wang, H., & Xu, L. (2022). Parasitic parameter extraction and identification method for HFT based on DC–DC converter in EV application. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 10, 4303–4318.
27. *Parameter identification of DC–DC converter based on dendrite net under fluctuating input voltages.* (2023). *IET Power Electronics*.
28. *Parameter estimation of power electronic converters with physics-informed machine learning.* (2022). *IEEE Transactions on Power Electronics*. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2022.9779551>.
29. Aguila-Leon, J., et al. (2021). Particle swarm optimization, genetic algorithm and grey wolf optimizer algorithms performance comparative for a DC–DC boost converter PID controller. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, 6(1), 619–625.
30. Jia, D., & Wang, D. (2024). Current stress minimization based on particle swarm optimization for dual active bridge DC–DC converter. *Actuators*, 13(10), Article 421. <https://doi.org/10.3390/actuators13100421>.
31. *Enhancing efficiency in bidirectional DC–DC converters through PSO-based optimization.* (2024). In *Proceedings of an IEEE conference*.
32. Choksi, K., Mirza, A. B., Zhou, A., Singh, D., Hijikata, M., & Luo, F. (2023). Self-evolving digital twin-based online health monitoring of multiphase boost converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 38(12), 16100–16117. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2023.3311710>.
33. De Benedetto, M., et al. (2022). A real-time digital twin approach on three-phase power converters applied to condition monitoring. *Applied Energy*.
34. Di Nezio, G., et al. (2022). Digital twin based real-time analysis of DC–DC boost converters. In *Proceedings of the IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. IEEE.
35. 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, 9850–9864.
36. Saharia, B. J., & Sarmah, N. (Year). Comparison of popular metaheuristic optimization algorithms for the optimal design of DC–DC converters. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*.
37. Baida, V., & Velohorskyi, O. (2025). Metodolohiia diahnostryky aparatnoho zabezpechennia z vykorystanniam informatsiinoi tekhnolohii tsyfrovoho dviinyka. [Methodology for diagnosing hardware 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).

References

1. Siemens AG. (2024). *The true cost of downtime 2024: Fortune Global 500 analysis* (Siemens/Senseye). Siemens AG.
2. Yang, S., Bryant, A., Mawby, P., Xiang, D., Ran, L., & Tavner, P. (2011). An industry-based survey of reliability in power electronic converters. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 47(3), 1441–1451. <https://doi.org/10.1109/TIA.2011.2124436>.
3. 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, 631. <https://doi.org/10.3390/machines12090631>
4. Lei, Z., Zhou, H., Dai, X., et al. (2023). Digital twin based monitoring and control for DC–DC converters. *Nature Communications*, 14, Article 5604. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-41248-z>.
5. McKinsey & Company. (2022). *Digital twins: The key to smart product development*. McKinsey Digital.
6. MarketsandMarkets. (2020). *Digital twin market: Global forecast to 2025*. Market Research Report.
7. Xiao, B., Zhong, J., Bao, X., et al. (2024). Digital twin-driven prognostics and health management for industrial assets. *Scientific Reports*, 14, Article 13443. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-63990-0>.

8. 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, 393. <https://doi.org/10.3390/electronics7120393>.
9. Erickson, R. W., & Maksimović, D. (2020). *Fundamentals of power electronics* (3rd ed.). Springer.
10. Yao, K., Tang, W., Hu, W., & Lyu, J. (2015). A current-sensorless online ESR and C identification method for output capacitor of buck converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30(12), 6993–7005. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2406335>.
11. Mahmud, T., & Santos Jr., E. C. D. (2025). *DNN-based digital twin framework of a DC–DC buck converter using spider monkey optimization algorithm* (arXiv:2509.06279). arXiv. <https://arxiv.org/abs/2509.06279>.
12. 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.2020.3018420>.
13. Milton, M., de la O, C., Ginn, H., & Benigni, A. (2020). Controller-embeddable probabilistic real-time digital twins for power electronic converter diagnostics. *IEEE Transactions on Power Electronics*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2020.2971775>.
14. Di Nezio, G., Benedetto, M., Lidozzi, A., & Solero, L. (2023). DC–DC boost converters parameters estimation based on digital twin. *IEEE Transactions on Industry Applications*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1109/TIA.2023.3286832>.
15. Ortiz-Castrillón, J. R., Saldarriaga-Zuluaga, S. D., Muñoz-Galeano, N., *et al.* (2023). Optimal sliding-mode control of semi-bridgeless boost converters considering power factor corrections. *Energies*, 16(17), 6282. <https://doi.org/10.3390/en16176282>.
16. Nishat, M. M., Faisal, F., Evan, A. J., Rahaman, M. M., Sifat, M. S., & Rabbi, H. M. F. (2020). Development of genetic algorithm (GA) based optimized PID controller for stability analysis of DC–DC buck converter. *Journal of Power and Energy Engineering*, 8(9), 8–19.
17. *Steady state and transient state analysis of buck–boost converter with genetic algorithm optimized PID controller.* (2023). In *Proceedings of an IEEE conference*. <https://doi.org/10.1109/document/10084253>.
18. Gill, L., Neely, J. C., Rashkin, L. J., Flicker, J. D., & Kaplar, R. (2020). Co-optimization of boost converter reliability and volumetric power density using genetic algorithm. In *Proceedings of the IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)* (pp. 1–7). IEEE.
19. *Buck converter parameters design using artificial intelligence-based genetic algorithm.* (2024). In *Proceedings of an IEEE conference*. <https://doi.org/10.1109/document/10808195>.
20. Ren, L., & Gong, C. (2019). An online ESR estimation method for output capacitor of boost converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34(10), 10153–10165. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2889462>.
21. *ESR estimation for aluminum electrolytic capacitor of power electronic converter based on compressed sensing and wavelet transform.* (2021). *IEEE Transactions on Power Electronics*.
22. *ESR estimation schemes of output capacitor for buck converter from capacitor perspective.* (2020). *Electronics*, 9(10), Article 1596. <https://doi.org/10.3390/electronics9101596>.
23. *Switched-resistance method for inductor DCR and switch parameter estimation of DC–DC converter.* (2023). *IEEE Transactions on Power Electronics*.
24. *Online inductance monitoring based on dynamic characteristics and ESR effect compensation for buck converter without current sensor.* (2024). *IEEE Transactions on Power Electronics*.
25. *An approach for online estimation of on-state resistance in SiC MOSFETs without current measurement.* (2023). *IEEE Transactions on Power Electronics*.
26. Tuluhong, A., Wang, W., Li, Y., Wang, H., & Xu, L. (2022). Parasitic parameter extraction and identification method for HFT based on DC–DC converter in EV application. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 10, 4303–4318.
27. *Parameter identification of DC–DC converter based on dendrite net under fluctuating input voltages.* (2023). *IET Power Electronics*.
28. *Parameter estimation of power electronic converters with physics-informed machine learning.* (2022). *IEEE Transactions on Power Electronics*. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2022.9779551>.

29. Aguila-Leon, J., *et al.* (2021). Particle swarm optimization, genetic algorithm and grey wolf optimizer algorithms performance comparative for a DC–DC boost converter PID controller. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, 6(1), 619–625.
30. Jia, D., & Wang, D. (2024). Current stress minimization based on particle swarm optimization for dual active bridge DC–DC converter. *Actuators*, 13(10), Article 421. <https://doi.org/10.3390/actuators13100421>.
31. *Enhancing efficiency in bidirectional DC–DC converters through PSO-based optimization.* (2024). In *Proceedings of an IEEE conference*.
32. Choksi, K., Mirza, A. B., Zhou, A., Singh, D., Hijikata, M., & Luo, F. (2023). Self-evolving digital twin-based online health monitoring of multiphase boost converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 38(12), 16100–16117. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2023.3311710>.
33. De Benedetto, M., *et al.* (2022). A real-time digital twin approach on three-phase power converters applied to condition monitoring. *Applied Energy*.
34. Di Nezio, G., *et al.* (2022). Digital twin based real-time analysis of DC–DC boost converters. In *Proceedings of the IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. IEEE.
35. 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, 9850–9864.
36. Saharia, B. J., & Sarmah, N. (Year). Comparison of popular metaheuristic optimization algorithms for the optimal design of DC–DC converters. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*.
37. Baida, V., & Velohorskyi, O. (2025). Metodolohiia diahnostryky aparatnoho zabezpechennia z vykorystanniam informatsiinoi tekhnolohii tsyfrovoho dviinyka. [Methodology for diagnosing hardware 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).

Дата першого надходження статті до видання: 25.11.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 09.12.2025

UDC 004.942

Vladyslav Baida¹, Oleksandr Velihorskyi²

¹ PhD 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&hl=en>

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

E-mail: o.veligorskiy@stu.cn.ua. **ORCID:** 0000-0002-8256-7339

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

IDENTIFICATION OF PARASITIC PARAMETERS OF A DC CONVERTER MODEL USING A GENETIC ALGORITHM

This paper investigates the application of genetic algorithms for optimizing parasitic parameters of mathematical models of DC-DC buck and boost converters to create high-precision digital twins for hardware diagnostics. The research addresses a critical gap in power electronics where parasitic parameters (winding resistance, equivalent series resistance of capacitors, parasitic inductance, transistor switching delays, and diode characteristics) introduce discrepancies between nominal component values and actual circuit behavior, making accurate fault detection and component degradation monitoring challenging.

An approach for identifying seven parasitic parameters was proposed based on 6705 experimental measurements collected over four hours from a physical buck converter operating under constant conditions (12V input, 50% PWM duty cycle, 44 μ F capacitance, 3.8 Ω load resistance). The implementation utilizes PySpice for circuit simulation and employs a genetic algorithm with 100 generations and population size of 50 to optimize parameters including gate rise/fall times (0.1-100 ns), transistor on-resistance (1 p Ω -1 m Ω), diode parameters, capacitor ESR (1 m Ω -0.5 Ω), and parasitic inductance (1 pH-100 nH).

A midpoint-based procedure was implemented to identify target signals for optimization, ensuring the model produces outputs equidistant from maximum and minimum measured values. Moving average filtering (17-sample window) reduced current ripple variance by factor of 2.83. The multi-objective fitness function incorporated weighted coefficients (0.35 for average voltage, 0.3 for voltage ripple, 0.2 for average current, 0.15 for current ripple) to prioritize critical parameters. Logarithmic scaling was applied to six parameters spanning multiple orders of magnitude, ensuring uniform exploration of the solution space.

Optimization results demonstrated symmetric deviations of $\pm 41.69\%$ for voltage ripples and $\pm 42.25\%$ for current ripples, enabling establishment of unified threshold values for diagnostic methodology. Unlike previous research predominantly using Particle Swarm Optimization (PSO), this study provides the first comprehensive application of genetic algorithms specifically for parasitic parameter identification in buck/boost converter digital twins based on experimental measurements.

The proposed approach enables non-invasive creation of accurate digital twins without requiring specialized measurement equipment or taking systems offline, making it suitable for predictive maintenance applications. The method can be extended to boost topology and integrated into real-time monitoring systems for early detection of component degradation in critical power electronics applications.

Keywords: genetic algorithm; modeling; cyber-physical system; hardware; digital twin.

Fig.: 7. Table.: 7. References.: 37.