

УДК 004.896 : 004.054

Л.А. БАДІМІНА,
В.М. ЧЕШУН,
В.І. ЧОРНЕНЬКИЙ
Хмельницький національний університет

ГЕНЕТИЧНІ АЛГОРИТМИ В СИНТЕЗІ ДІАГНОСТИЧНИХ ТЕСТІВ ДЛЯ ЦИФРОВИХ ПРИСТРОЇВ

В роботі наведено результати дослідження аналогій між задачами технічної діагностики і теорією генетичних алгоритмів, що дозволило уточнити базові принципи застосування генетичних для синтезу дискретних тестів відповідно до наявних задач. Обрано спосіб представлення даних для синтезу тестів генетичними алгоритмами, обґрунтовано вибір рівномірного кросингвера із застосуванням пари векторів рекомбінації, запропоновано функції відбору хромосом для схрещування та формули генерації хромосом та векторів рекомбінації нового покоління. Отримані результати є основою для алгоритмічної реалізації методу.

Ключові слова: технічна діагностика, генетичні алгоритми, синтез тестів, цифрові пристрої.

L. BADIMINA,
V. CHESHUN,
V. CHORNENKYI
Khmelnitskyi National University

GENETIC ALGORITHMS AND SYNTHESIS OF DIAGNOSTIC TESTS FOR DIGITAL DEVICES

The continuous improvement of the element base and the complexity increasing of digital devices and systems makes it urgent to develop new tools and methods for their diagnosis. One of the promising areas of development of technical diagnostics is the use of genetic algorithms in the development of diagnostic tests. In the article presents the results of research on analogies between the tasks of synthesis of diagnostic tests for digital devices and principles of the genetic algorithms implementation. This allowed to determine the basic principles of the genetic algorithms application for the discrete tests synthesis in accordance with the tasks of reducing the size of the used tests. For realization of procedures of synthesis of tests using genetic algorithms a method of initial data representation is selected and general principles for the formation of test-vectors generations are defined. The choice of uniform crossover operator with the use of two recombination vectors is substantiated, the rules are formulated and the chromosome selection function for hybridization is proposed. Also defined rules and functions for the formation of chromosomes and for the vectors recombination in new generations. The perspective and conditions of the mutation operations use for improving of the developed tests capabilities are considered. The simplicity of the proposed functions indicates the efficiency of the investigated variant of the genetic algorithms theory application, which determines the persistence and relevance of their application in the problems of synthesis and optimization of diagnostic tests for digital devices and systems. The given solutions are the basis for algorithmic and program implementation of the discrete diagnostic tests synthesis method for digital devices using genetic algorithms.

Key words: technical diagnostics, genetic algorithms, synthesis of tests, digital devices.

ВСТУП. Стрімкий розвиток і постійне вдосконалення технологій виготовлення дискретних інтегральних компонентів надають останнім все більших можливостей і постійно розширюють сфери їх застосування, що зумовлює появу все нових і нових різновидів цифрових пристроїв і систем. Функціональне різноманіття і висока продуктивність сучасних цифрових пристроїв і систем в сукупності зі зменшенням вартості дозволяють застосовувати їх у вирішенні завдань різної складності від елементарних побутових і до надскладного керування технологічними ми процесами та обладнанням, збої в роботі яких може нести загрозу життю [1].

Далеко не останню роль в широкому розповсюдженні цифрових пристроїв і систем відіграють високі показники їх надійності, що забезпечуються реалізацією комплексу системних заходів відповідного спрямування. До числа засобів підвищення надійності слід віднести також верифікацію, контроль та діагностування на різних етапах життєвого циклу елементної бази та електронних виробів на її основі [2–4].

Досягнення в збільшенні інтегральної складності дискретних компонентів мають негативні наслідки з точки зору технічної діагностики, оскільки компоненти в інтегральному виконанні мають обмежену кількість контактів і при ускладненні внутрішньої структури таких компонентів виникає потреба у розробці і застосуванні для їх перевірки тестів все більшої складності [2]. На сьогоднішній день розробка якісних тестів для перевірки сучасних електронних компонентів надвисокого ступеня інтеграції та електронної продукції на їх основі за фінансовими і часовими витратами значно перевищує вартість самих виробів, що зумовлює зацікавленість фахівців з технічної діагностики у автоматизації синтезу тестів. Через потребу враховувати велику кількість факторів та параметрів, а також застосування нетрадиційних підходів у

реалізації діагностичних випробувань, найбільш актуальною на сьогоднішній день є розробка інтелектуальних алгоритмів і засобів розв'язування діагностичних задач [2–4].

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ. Ускладнення задач технічної діагностики зумовило створення різноманітних спеціалізованих засобів з елементами інтелектуального опрацювання діагностичної інформації, серед яких можна виділити нейромережні засоби діагностування, системи на основі нечіткої логіки, експертні діагностичні системи тощо [5–7]. Зазначені засоби мають різні функціональні можливості та призначення і використовуються для вирішення різних видів завдань, що виникають в задачах технічної діагностики, але метою їх застосування завжди є підвищення ефективності діагностичних випробувань і зменшення ролі людського фактору як передумови виникнення великої кількості помилок.

Як перспективний напрямок інтелектуалізації обробки діагностичної інформації визнано застосування генетичних алгоритмів (ГА). Практика застосування ГА в задачах технічної діагностики не є новою, в роботах [8–11] описуються дослідження в цьому напрямку, що проводилися ще в 90-х роках минулого сторіччя. Одним із основних застосувань ГА в задачах технічної діагностики є оптимізація тестових послідовностей і алгоритмів діагностування, де ГА розглядаються як альтернатива таким традиційним методам оптимізації, як метод гілок та меж, метод динамічного програмування тощо [1, 11–14]. Існують також застосування ГА для відсіву надлишкових тестів з тестових послідовностей [15]. Відомі роботи, де ГА застосовуються для підбору контрольних точок об'єкта діагностування (ОД), що використовуються для реалізації тестових випробувань, а також для дослідження і модифікації структури ОД, зокрема, із застосуванням ROBDD-графів [16, 17].

В умовах постійного збільшення інтегральної складності дискретних електронних компонентів актуальною залишається задача синтезу якісних тестів, для розв'язування якої також може бути ефективно застосована теорія ГА [12].

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ. Задача синтезу тестів для діагностування дискретних пристроїв і систем з елементами високого ступеня інтеграції ніколи не втрачала актуальності і навпаки, актуальність вказаної задачі завжди загострювалась з появою нових інтегральних компонентів та технологій їх виготовлення.

ГА відносяться до категорії процедур пошуку, які виникли як спроба копіювання природних процесів наслідування та селекції (природного відбору) як основних рушійних факторів еволюційного розвитку. ГА застосовувались в різних сферах, де може бути використана теорія еволюційного розвитку і відбору, що визначалося проведенням попередніх досліджень [12, 18].

Таким чином, ефективне застосування ГА для синтезу тестів можливе за умови визначення асоціативних аналогій у досліджуваних процесах і теорії еволюційного вдосконалення на основі ГА, а також формулювання принципів і розробки алгоритмів застосування ГА в задачах технічної діагностики.

ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ. Тестове діагностування цифрових пристроїв і систем реалізується із застосуванням тестових послідовностей, що утворюються із наборів векторів двійкового коду фіксованої розрядності (тест-векторів). Існують різні варіанти класифікації тестових послідовностей за призначенням та реалізованими методами діагностування, але в загальному їх можна розділити на дві категорії [19]:

- тести виявлення несправностей (контрольні);
- тести локалізації несправностей (діагностичні).

Тести виявлення несправностей або тести перевірки справності ОД призначені для встановлення факту наявності або відсутності несправностей в його структурі, тобто, для класифікації ОД за принципом справний-несправний. Діагностичні випробування при цьому ведуться послідовною перевіркою гіпотез про знаходження ОД в можливих несправних станах, при чому, чим більше гіпотез може спростувати тест без зміни його складності та інших показників вартості, тим кращим він визнається. Тобто найкращою для реалізації тестів виявлення несправностей є тестова послідовність, що складається з мінімальної кількості тест-векторів і дозволяє перевірити можливість знаходження ОД в кожному з передбачуваних несправних станів.

Тести локалізації несправностей, як правило, застосовуються після тестів перевірки і призначені для визначення місця виникнення несправності в структурі ОД із заданою точністю, тобто для досягнення заданої глибини діагностування. Потреба застосування тестів локалізації несправностей після тестів перевірки пояснюється тим, що при побудові останніх метою є при кожній елементарній перевірці спростувати максимальну кількість гіпотез про наявність в ОД різних несправностей. Тобто у випадку підтвердження в ході елементарної перевірки факту наявності в ОД несправності, за результатами перевірки з числа передбачуваних несправних станів відокремлюється певна підмножина станів, стосовно яких залишається невизначеність щодо можливості перебування ОД в кожному з них. Призначенням тестів локалізації несправностей є спростування гіпотез про можливість знаходження ОД в усіх станах крім одного з залишкової підмножини несправних станів, що і призводить до ідентифікації несправного технічного

стану ОД з характерними для цього стану несправностями складових частин ОД. Оскільки в результаті застосування тестів перевірки несправностей можуть виникати різні залишкові підмножини можливих несправних станів ОД, для кожної із зазначених підмножин необхідно синтезувати власний тест локалізації несправностей. Як і для тесту перевірки, найкращими тестами локалізації несправностей вважаються ті, що дозволяють досягти мети при мінімальних затратах (мінімальна кількість тест-векторів у використовуваній тестовій послідовності).

Для підвищення ефективності процедур синтезу тестів в їх роботі використовуються статистичні дані ймовірностей знаходження ОД в кожному з допустимих технічних станів.

Для опису предметної області задач синтезу тестів введемо наступні множини опису вихідних даних:

- $L: \{l_1, l_2, \dots, l_i, \dots, l_k\}$ – множина можливих несправних технічних станів ОД;

- $P: \{P(l_1), P(l_2), \dots, P(l_i), \dots, P(l_k)\}$ – множина значень статистичних даних ймовірності знаходження

ОД в кожному з можливих технічних станів ОД $l_i \in L$;

- $T: \{t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_m\}$ – множина тест-векторів, розроблених для ідентифікації станів ОД $l_i \in L$;

- $R: \{r_1, r_2, \dots, r_i, \dots, r_m\}$ – множина отримуваних векторів відповідних реакцій при поданні на ОД

блоку тест-векторів $t_i \in T$.

Для спрощення подальшого аналізу спочатку приймемо за істину гіпотезу про взаємну незалежність тест-векторів $t_i \in T$ (аналогічно, взаємно незалежними будемо вважати вектори відповідних реакцій $r_i \in R$).

Як правило, тест-вектори $t_i \in T$ спочатку формуються для реалізації елементарних перевірок ОД на основі наявних діагностичних моделей зазначеного об'єкта та його складових, при чому широко використовують бібліотеки діагностичних тестів наявних в складі ОД типових вузлів. В таких випадках залишається відкритим питання реалізації узгодженої одночасної перевірки зазначених складових та суміщення декількох елементарних перевірок тестами $t_i \in T$ і $t_j \in T$ (при $i \neq j$) в часі для зменшення тривалості процесу тестових випробувань, що і є цільовою сферою застосування ГА.

Згідно з [7, 12], для застосування ГА характерним є ряд властивостей:

- використання не всіх значень параметрів задачі, а їх закодованої форми;

- кодування використовуваних параметрів двійковим кодом (для класичних ГА);

- однакова розмірність оброблюваних кодів;

- виконання пошуку не з певної стартової точки (кореневої вершини або початкового елемента), а з певної їх стартової сукупності (початкової популяції);

- використання цільової функції при виконанні перетворень;

- застосування ймовірнісних, а не детермінованих характеристик для відбору елементів генетичних перетворень.

Порівняння властивостей ГА і характерних особливостей задач синтезу дискретних тестів дозволяє відзначити їх подібність. Вхідні параметри задачі синтезу тестів, а саме значення тест-векторів $t_i \in T$ і векторів відповідних реакцій $r_i \in R$, є представленими двійковими кодами значеннями сигналів без уточнення інших їх характеристик. Сукупна розрядність кодів тест-векторів $t_i \in T$ і векторів відповідних реакцій $r_i \in R$ є сталою (або може бути зроблена такою) і визначається загальною кількістю використовуваних в діагностичних випробуваннях контрольних точок ОД. Для побудови якісних тестів виникає потреба аналізу різних варіантів можливостей одночасної реалізації декількох елементарних перевірок (стосовно всіх елементів $t_i \in T$ і $t_j \in T$, $i \neq j$), при чому відбір кандидатів для підвищення ефективності синтезу тестів традиційно ведеться за ймовірнісними характеристиками статистичних даних ймовірності знаходження ОД в кожному з можливих технічних станів ОД $l_i \in L$, що пов'язуються з характеристиками перевіряючої здатності елементів $t_i \in T$. Цільовою функцією в задачах синтезу тестів є мінімізація кількості застосовуваних в тестових послідовностях тест-векторів.

Таким чином, наявність асоціативних аналогій у досліджуваних процесах синтезу тестів і теорії застосування ГА зумовлює перспективність застосування інструментарію ГА для автоматизації синтезу тестів.

В реалізації ГА виділяють чотири основних операції [1, 7]:

- формування початкової популяції;

- відбір батьківських особин для схрещування;

- схрещування відібраних батьківських особин і формування особини потомка;

- мутація особини потомка.

Операції відбору, схрещування і мутації забезпечують формування нової популяції, яка в наступному циклі реалізації ГА може бути використана як початкова для подальшого вдосконалення (рис. 1) безпосередньо або після проведення певних процедур відсіву особин, що визнаються безперспективними за заданими критеріями оцінки пристосованості.

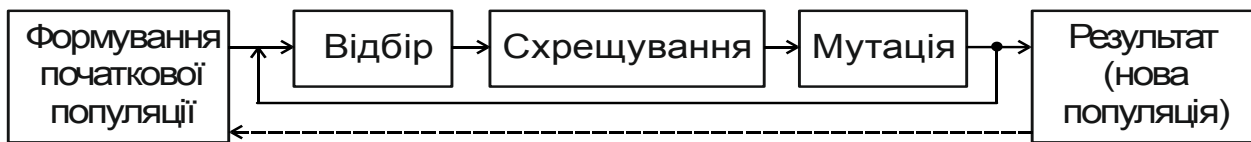


Рис. 1. Узагальнена схема роботи генетичного алгоритму

Особини популяції описуються двійковими кодами, які ідентифікуються як хромосоми, кожен розряд яких розглядається як окремий ген, що несе певну спадкову інформацію і може наслідуватись.

Операція відбору полягає у визначенні двох батьківських особин, хромосомні набори яких передбачають можливість і перспективність схрещування. Під критерієм доцільності схрещування враховуються ймовірнісні оціночні функції та параметри.

Метою операції схрещування є отримання особини наступного покоління (точніше, опису її генотипу у вигляді хромосоми), що наслідує найкращі (найсуттєвіші і найпотужніші) гени батьківських особин. Характер наслідування генів визначається особливостями використовуваного кросингвера. Кросингвери поділяються на точкові (з однією або декількома робочими точками) та рівномірні [7]. Точкові кросингвери характеризуються певною кількістю і заданими позиціями точок розриву батьківських хромосом, а також правилами рекомбінації отримуваних частин генного коду в хромосомі особини наступного покоління. Рівномірні оператори кросингверів передбачають застосування певного двійкового вектора, за яким і визначаються правила рекомбінації частин генного коду батьківських хромосом в хромосомі особини наступного покоління. Рівномірні оператори дозволяють відобразити і принципи роботи точкових кросингверів довільної складності (це робить їх більш універсальними), а також при класичному двійковому представленні векторів хромосом і векторів рекомбінації надають можливість формування коду хромосоми особини наступного покоління із застосуванням звичайних операцій булевої алгебри логіки.

Операція мутації має за мету вдосконалення отримуваних після схрещування особин нового покоління шляхом зміни окремих їх генів на значення, що не є характерними для батьківських особин загалом або отримуваного результату їх рекомбінації зокрема. Як правило, мутація полягає в заміні значень окремих розрядів двійкового коду хромосоми на інверсні. Повертаючись до задач технічної діагностики зазначимо, що основою для синтезу тестів є описи характеру використання і стану контрольних точок ОД при реалізації кожної i -ї тестової перевірки, що відображаються значеннями тест-векторів $t_i \in T$ і векторів відповідних реакцій $r_i \in R$. Тобто в якості хромосомного набору, що ідентифікує характерні особливості i -ї тестової перевірки, можна розглядати сукупність двійкових кодів векторів $t_i \in T$ і $r_i \in R$:

$$c_i = \text{text}(t_i) + \text{text}(r_i), \quad (1)$$

де c_i – хромосома опису тестової перевірки із застосуванням тест-вектора $t_i \in T$, формована додаванням значень векторів $t_i \in T$ і $r_i \in R$ як символічних рядків (функція text).

Таким чином, на основі множини тест-векторів T і множини векторів відповідних реакцій R із застосуванням (1) може бути сформована множина хромосом початкової популяції C для реалізації ГА: $C: \{c_1, c_2, \dots, c_i, \dots, c_m\}$.

Особливістю процесу тестового діагностування сучасних дискретних ОД є те, що для виконання елементарних тестових перевірок $t_i \in T$ можуть використовуватись різні набори контрольних точок із загального числа доступних або значення сигналів на певних контрольних точках для $t_i \in T$ і $r_i \in R$ визначаються як неактуальні (тобто можуть приймати довільні значення). Тобто для $t_i \in T$ і $r_i \in R$ значення сигналів на контрольних точках ОД можна поділити на актуальні (із чітко визначеним рівнем сигналу 0 або 1) і неактуальні (позначаються символом "x" і можуть замінюватись на 0 або 1 за потреби). Саме наявність контрольних точок з неактуальними значеннями сигналів, що можуть змінюватись довільним чином, надає можливість одночасної реалізації тестових перевірок $t_i \in T$ і $t_j \in T$ ($i \neq j$) за умови, що актуальні значення векторів $t_i \in T$ і $t_j \in T$, а також векторів $r_i \in R$ і $r_j \in R$, не вступають в протиріччя.

В поняттях теорії ГА актуальні значення діагностичних сигналів, що відображаються в розрядах коду хромосом $c_i \in C$, набувають ролі сильних генів, які мають унаслідуватись в наступних поколіннях після операцій схрещування. Оскільки позиції сильних і слабких генів в хромосомах опису різних тестових випробувань можуть змінюватись, визначення точок розриву хромосом для застосування точкових кросингверів в більшості випадків діагностичних задач не є можливим, що зумовлює доцільність застосування рівномірного кросингверу. В якості векторів рекомбінації для реалізації ГА з рівномірним кросингвером співставимо кожному вектору хромосоми $c_i \in C$ вектор-маску h_i аналогічної розрядності, тобто сформуємо множину векторів рекомбінації: $H: \{h_1, h_2, \dots, h_i, \dots, h_m\}$. У векторі рекомбінації $h_i \in H$ значення кожного розряду будемо визначати рівним одиниці, якщо відповідний розряд в коді хромосоми $c_i \in C$ відповідає сильному гену, що не може бути втрачений при схрещуванні, і рівним нулю – в іншому випадку. Наприклад, якщо в операцію формування коду хромосоми вступають два простих вектори

$t_i=0xx101xx$ і $r_j=01x0$ і при застосуванні функції (1) в двійковому коді хромосоми слабкі гени приймають значення "0" (замість "x"), то результатом будуть вектори $c_i=000101000100$ і $h_i=100111001101$. Як видно з наведеного прикладу, вектори хромосом $c_i \in C$ і рекомбінації $h_i \in H$ зберігають в собі всю інформацію про початкові діагностичні вектори $t_i \in T$ і $r_i \in R$ і допускають відтворення їх початкових значень.

Запропоноване представлення діагностичних даних у вигляді векторів хромосом $c_i \in C$ і векторів рекомбінації $h_i \in H$ дозволяє сформувати базові правила для визначення можливості схрещування.

Особини з хромосомними наборами $c_i \in C$ і $c_j \in C$ можуть бути схрещені за двох умов:

- якщо позиції сильних генів векторів рекомбінації $h_i \in H$ і $h_j \in H$ не співпадають;

- якщо при співпаданні певних позицій сильних генів у векторах рекомбінації $h_i \in H$ і $h_j \in H$ співпадають і значення самих генів у зазначених позиціях хромосом $c_i \in C$ і $c_j \in C$.

Перевірку допустимості схрещування особин з хромосомними наборами $c_i \in C$ і $c_j \in C$ можна реалізувати порозрядним виконанням логічних операцій над векторами рекомбінації і хромосом. Ознакою відсутності протипоказань до схрещування є отримання нульового результату контрольної функції f_k :

$$f_k = (c_i \wedge h_i) \oplus (c_j \wedge h_j) = 0. \quad (2)$$

Оскільки в хромосомних наборах $c_i \in C$ слабкі гени замінено нулями, то, при виконанні контрольної умови (2), вектор хромосоми c_k^1 особини нового (першого) покоління C^1 визначається як порозрядна диз'юнкція векторів батьківських хромосом $c_i \in C$ і $c_j \in C$:

$$c_k^1 = c_i \vee c_j. \quad (3)$$

Для забезпечення можливості генерації наступних поколінь важливим є оновлення векторів рекомбінації для відображення сильних генів отримуваних при схрещуванні особин. Нове значення вектора рекомбінації також визначається як порозрядна диз'юнкція векторів рекомбінації батьківських хромосом $h_i \in H$ і $h_j \in H$, що для $c_k^1 \in C^1$ відображується формулою:

$$h_k^1 = h_i \vee h_j. \quad (4)$$

Отримувані згідно (3) в коді хромосом тест-вектори нового покоління поєднують в собі здатність перевіряти стани ОД $l_i \in L$, що була властивою батьківським особинам. Імовірність виявлення несправності при перевірці ОД із застосуванням тест-вектора нового покоління визначається сумарною імовірністю виявлення несправностей всіма батьківськими особинами, чий гени унаслідував зазначений тест-вектор.

Для досягнення максимального ефекту від застосування ГА при синтезі дискретних тестів виявлення несправностей доцільно першочергово виконувати операцію схрещування особин, що здатні виявляти технічні стани ОД $l_i \in L$ з найбільшими відповідними їм значеннями імовірності $P(l_i)$. При синтезі дискретних тестів локалізації несправностей доцільно виконувати операцію схрещування особин таким чином, щоб відносно залишкової підмножини можливих станів здатність виявляти технічні стани ОД отримуваним потомком була максимально наближеною до половини значення сумарної ймовірності знаходження ОД в цих станах.

Особини, що на підставі (2) визнаються на певному етапі реалізації ГА безперспективним для створення потомків, відокремлюються в множину непридатних до репродукції. Ознакою завершення схрещувань при реалізації ГА є перенесення всіх особин останнього покоління в множину непридатних до репродукції. Виконання ГА може перериватись і за наявності придатних до репродукції особин за умови наявності попередньо визначених критеріїв дострокового зупину, але, з урахуванням простоти використовуваних функцій (1–4) і важливості задачі отримання мінімальних тестів, а також відносно невеликої кількості можливих поколінь при застосуванні ГА в досліджуваних задачах, в ході синтезу дискретних тестів доцільно виконати всі можливі схрещування. При формуванні поколінь слід враховувати можливість однакових або подібних потомків і стосовно кожного нового покоління доцільно проводити процедуру відсіву дублікатів, що також може реалізовуватись із застосуванням ГА [15].

Стосовно сформованих векторів хромосом, що не приймають участь в подальших схрещуваннях, може застосовуватись операція мутації, яка полягає в інвертуванні значень залишкових слабких генів і оцінці ефективності результату (моделюванням або експериментально). Можлива мутація і сильних генів, але при цьому потрібен контроль за збереженням тестів здатності виявляти несправності.

ВИСНОВКИ. Проведені дослідження вказують на наявність суттєвих аналогій між операціями синтезу і оптимізації діагностичних тестів для цифрових пристроїв і систем та принципами реалізації генетичних алгоритмів, що зумовлює перспективність і актуальність застосування останніх в задачах технічної діагностики. Визначені загальні принципи формування поколінь векторів тестових впливів із застосуванням теорії генетичних алгоритмів для зменшення кількості необхідних перевірок об'єкта діагностування є основою для алгоритмічної реалізації методу. Простота функцій формування та перетворення хромосомних наборів опису тестових перевірок, а також функції оцінки можливостей

реалізації операції схрещування на їх основі, свідчить про ефективність і продуктивність досліджуваного варіанту застосування теорії генетичних алгоритмів, що зумовлює перспективність і актуальність застосування останніх в задачах синтезу і оптимізації діагностичних тестів для цифрових пристроїв і систем.

Література

1. Абдуллаев П. Ш. Применение генетических алгоритмов при диагностировании авиационных ГТД / П. Ш. Абдуллаев, А. Дж. Мирзоев // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – Харків : ХАІ, 2016. – № 7(134)– С. 139–146.
2. Жердев М.К. Концептуальні засади методу діагностування сучасних цифрових типових елементів заміни по форматним частотам перехідного процесу в шині живлення / М.К. Жердев, В.О. Савран // Зб. наук. праць Військового інституту Київського НУ ім. Тараса Шевченка. – К. : ВІКНУ, 2016. – Вип. 52. – С. 20–32.
3. Ленков Є.С. Узагальнена математична модель процесу технічного обслуговування і ремонту складної техніки / Є.С. Ленков // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – Хмельницький : ХНУ, 2017. – № 2 (247). – С. 186–191.
4. Шевченко В.В. Контроль технічного стану цифрових типових елементів заміни за допомогою електромагнітного методу (способу) діагностування / В. В. Шевченко // Системи обробки інформації. – Харків : ХАІ, 2015. – Вип. 8. – С. 57–59.
5. Сівак В.А. Методи функціональної належності компонентів діагностичних засобів, які використовують технологію нечіткої логіки / В.А. Сівак // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – Хмельницький : ХНУ, 2015. – № 6 (231). – С. 203–208.
6. Чорненський В.І. Алгоритми діагностування цифрових пристроїв апаратними засобами на базі штучних нейронних мереж / В.І. Чорненський, В.М. Чешун // Зб. наук. праць Військового інституту Київського НУ ім. Тараса Шевченка. – К. : ВІКНУ, 2010. – Вип. 27. – С. 154–161.
7. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилинский, Л. Рутковский. – М. : Горячая линия-Телеком, 2006. – 452 с.
8. Prinetto P. An automatic test pattern generator for larges equential circuits based on genetic algorithms / P. Prinetto, M. Rebaudengo, M. Sonza Reorda // Proc. Int. Test Conf. – 1994. – P. 240–249.
9. Rudnick E.M. Sequential Circuit Test Generation in a Genetic Algorithm Framework / E.M. Rudnick, J.H. Patel, G.S. Greenstein, T.M. Niermann // Proc. Design Automation Conf. – 1994. – P. 698–704.
10. Городилов А.Ю. Генетический алгоритм диагностирования цифровых устройств / А.Ю. Городилов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – Пермь : ПНИПУ, 2013. – № 7. – С. 54–62.
11. Дубровин В.И. Диагностика на основе генетических алгоритмов / В.И. Дубровин, Е. Н. Федорченко // Радиоелектроніка, Інформатика, Управління. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2006. – № 2. – С. 115–120.
12. Попов В.А. Оптимизационные задачи на основе генетического поиска / В.А. Попов, А.В. Бердочник // Системи обробки інформації – Харків : ХУПС, 2010. – Вип. 9 (90). – С. 217–220.
13. Соколова Э.С. Оптимизация коэффициента глубина поиска дефектов методом генетических алгоритмов / Э.С. Соколова, С.Н. Капранов // Контроль. Диагностика. – М. : ООО "Издательский дом "Спектр", 2004. – № 4. – С. 32–39.
14. Иванов Д.Е. Генетические алгоритмы построения входных идентифицирующих после-довательностей цифровых устройств / Д.Е. Иванов – Донецк : ТОВ «Цифровая типография», 2012. – 240 с.
15. Миронов С.В. Генетические алгоритмы для сокращения диагностической информации / С.В. Миронов, Д.В. Сперанский // Автоматика и телемеханика. – М. : Академиздатцентр «Наука» РАН, 2008. – №7. – С. 146–156.
16. Дмитриев Д.В. Адаптация генетических алгоритмов к решению задач назначения точек контроля в объектах с большим числом состояний / Д.В. Дмитриев, Э.С. Соколова, С.Н. Капранов // Нейрокомпьютеры. – М. : Издательство «Радиотехника», – 2007. – № 11. – С. 59–64.
17. Евдокимов А.А. Применение символьных вычислений к исследованию дискретных моделей некоторых классов генных сетей / А.А. Евдокимов, С.Е. Кочемазов, А.А. Семенов // Вычислительные технологии. – М. : НИВЦ МГУ, 2011. – Т. 16. № 1. – С. 30–47.
18. Juang C.F. A TSK-Type Recurrent Fuzzy Net-work for Dynamic Systems ceasing by Neural Network and Genetic Algorithms / C.F. Juang // IEEE Trans. on Fuzzy Systems. 2002. – Vol. 10, Issue 2. – P. 155–170.
19. Тюрин С.Ф. Разработка контрольных и диагностических тестов для КМОП элементов с избыточным базисом / С.Ф. Тюрин, О.А. Громов // Приволжский научный вестник. – Ижевск : ИЦНП, 2013. – № 1 (17). – С. 13–21.

References

1. Abdullayev P. Sh. Primeneniye geneticheskikh algoritmov pri diagnostirovani aviatsonnykh GTD / P. Sh. Abdullayev, A.Dzh. Mirzoyev // Aviatsiino-kosmichna tekhnika i tekhnolohiia. – Kharkiv : KhAI, 2016. – № 7(134) – S. 139-146.
2. Zherdiev M.K. Kontseptualni zasady metodu diahnostuvannia suchasnykh tsyfrovyykh typovykh elementiv zaminy po formatnym chastotam perekhidnoho protsesu v shyni zhyvlennia / M.K. Zherdiev, V.O. Savran // Zb. nauk. prats Viiskovoho instytutu Kyivskoho NU im. Tarasa Shevchenko. – K. : VIKNU, 2016. – Vyp. 52. – S. 20-32.
3. Lienkov Ye.S. Uzahalnena matematychna model protsesu tekhnichnoho obsluhovuvannia i remontu skladnoi tekhniki / Ye.S. Lienkov // "Herald of Khmelnytskyi national university", № 2 (247), 2017. - Technical sciences. – Khmelnytskyi: KhNU. – S. 186-191.
4. Shevchenko V.V. Kontrol tekhnichnoho stanu tsyfrovyykh typovykh elementiv zaminy za dopomohoiu elektromahnitnoho metodu (sposobu) diahnostuvannia / V. V. Shevchenko // Systemy obrobky informatsii. - Kharkiv: KhAI, 2015. - Vyp. 8. - S. 57-59.
5. Sivak V.A. Metody funktsionalnoi nalezhnosti komponentiv informatsiynykh zasobiv, yaki vykorystovuiut tekhnolohiiu nechetkoi lohiky / V.A. Sivak // "Herald of Khmelnytskyi national university", № 6 (231), 2015. - Technical sciences. – Khmelnytskyi: KhNU. – S. 203-208.
6. Chornenkyi V.I. Alhorytmy diahnostuvannia tsyfrovyykh prystroiv aparatnymy zasobamy na bazi shtuchnykh neuronnykh merezh / V.I. Chornenkyi, V.M. Cheshun // Zb. nauk. prats Viiskovoho instytutu Kyivskoho NU im. Tarasa Shevchenko. – K. : VIKNU, 2010. – Vyp. 27. – S. 154-161.
7. Rutkovskaya D. Neyronnyye seti. geneticheskiye algoritmy i nechetkiye sistemy / D. Rutkovskaya. M. Pilinskiy. L. Rutkovskiy. - M.: Goryachaya liniya-Telekom. 2006. - 452 s.
8. Prinetto P. An automatic test pattern generator for larges equential circuits based on genetic algorithms / P. Prinetto, M. Rebaudengo, M. Sonza Reorda // Proc. Int. Test Conf. – 1994. – P.240–249.
9. Rudnick E.M. Sequential Circuit Test Generation in a Genetic Algorithm Framework / E.M. Rudnick, J.H. Patel, G.S. Greenstein, T.M. Niermann // Proc. Design Automation Conf. – 1994. – P.698–704.
10. Gorodilov A.Yu. Geneticheskii algoritm diagnostirovaniya tsyfrovyykh ustroystv / A.Yu. Gorodilov // Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotekhnika. informatsionnyye tekhnologii. sistemy upravleniya. – Perm: PNIPU. 2013. – № 7. – S. 54-62.

11. Dubrovin V.I. Diagnostika na osnove geneticheskikh algoritmov / V.I. Dubrovin. E. N. Fedorchenko // Radiyelektronika. Informatika. Upravlinnya. – Zaporizhzhya: ZNTU. 2006. – № 2. – S. 115-120.
12. Sokolova E.S. Optimizatsiya koeffitsiyenta glubina poiska defektov metodom geneticheskikh algoritmov / E.S. Sokolova. S.N. Kapranov // Kontrol. Diagnostika. – M. : OOO "Izdatelskiy dom "Spektr". 2004. – № 4. – S. 32-39.
13. Ivanov D.E. Geneticheskiye algoritmy postroyeniya vkhodnykh identifikatsionnykh posle-dovatel'nostey tsifrovyykh ustroystv. / D.E. Ivanov – Donetsk: TOV «Tsifrovaya tipografiya». 2012. – 240 s.
14. Mironov S.V. Geneticheskiye algoritmy dlya sokrashcheniya diagnosticheskoy informatsii / S.V. Mironov. D.V. Speranskiy // Avtomatika i telemekhanika. – M. : Akademizdatssentr «Nauka» RAN. 2008. – No7. – S.146-156.
15. Dmitriyev D.V. Adaptatsiya geneticheskikh algoritmov k resheniyu zadach naznacheniya toчек kontrolya v obyektakh s bolshim chislom sostoyaniy / D.V. Dmitriyev. E.S. Sokolova. S.N. Kapranov // Neyrokomp'yutery. M: Izdatelstvo «Radiotekhnika» № 11. 2007. – S.59-64.
16. Evdokimov A.A. Primeneniye simvolnykh vychisleniy k issledovaniyu diskretnykh modeley nekotorykh klassov gennykh setey / A.A. Evdokimov. S.E. Kochemazov. A.A. Semenov // Vychislitelnyye tekhnologii. – M. : NIVTs MGU. 2011. – T. 16. № 1. - S. 30-47.
17. Tyurin S.F. Razrabotka kontrolnykh i diagnosticheskikh testov dlya KMOP elementov s izbytochnym bazisom / S.F. Tyurin. O.A. Gromov // Privolzhskiy nauchnyy vestnik. – Izhevsk : ITsNP. 2013. –No 1 (17). – S.13-21.
18. Juang C.F. A TSK-Type Recurrent Fuzzy Net-work for Dynamic Systems ceasing by Neural Network and Genetic Algorithms / C.F. Juang //IEEE Trans. on Fuzzy Systems. 2002. – Vol. 10, Issue 2. – P. 155-170.
19. Popov V.A. Optimizatsionnyye zadachi na osnove geneticheskogo poiska / V.A. Popov. A.V. Berdochnik // Systemy obrobky informatsii – Kharkiv: KhUPS, 2010. – Vyp. 9 (90). – S.217-220.