

УДК 004.942

Ю.О. Гунченко,
доктор технічних наук, доцент
Є.С. Ленков,
кандидат технічних наук,
В.М. Чешун,
кандидат технічних наук,
С.О. Прокопчук

ДОСЛІДЖЕННЯ І РЕОРГАНІЗАЦІЯ СТРУКТУРИ ЦИФРОВОГО ОБ'ЄКТА ДІАГНОСТУВАННЯ НА ОСНОВІ ГРАФ-МОДЕЛІ

У статті описано принципи застосування граф-моделі для дослідження і реорганізації структури об'єкта діагностування в задачах тестопридатного синтезу цифрових схем.

Структурну схему досліджуваного як об'єкта діагностування цифрового пристрою запропоновано представляти формалізованою граф-моделлю, для опису якої застосовуються елементи теорії множин, що дозволяє виявити проблемні в проведенні тестових випробувань шляхи передачі контрольованих сигналів і через реорганізацію граф-моделі визначити вимоги щодо внесення змін у структуру пристрою для збільшення його тестопридатності.

Доведено, що збільшення тестопридатності цифрових схем може бути досягнуто при незначному збільшенні їх апаратної складності введенням додаткових комбінаційних складових.

Ключові слова: тестова діагностика, цифрові пристрої, тестопридатність, граф-модель.

В статті описані принципи применення граф-моделі для дослідження і реорганізації структури об'єкта діагностування в задачах тестопридатного синтезу цифрових схем.

Структурную схему исследуемого в качестве объекта диагностирования цифрового устройства предложено представлять формализованной граф-моделью, для описания которой применяются элементы теории множеств, что позволяет выявить проблемные в проведении тестовых испытаний пути передачи контролируемых сигналов и через реорганизацию граф-модели определить требования по внесению изменений в структуру устройства для увеличения его тестопригодности.

Доказано, что увеличение тестопригодности цифровых схем может быть достигнуто при незначительном увеличении их аппаратной сложности введением дополнительных комбинационных составляющих.

Ключевые слова: тестовая диагностика, цифровые устройства, тестопригодность, граф-модель.

Paper describes the application of the principles of the use of the graph model for the research and reorganization of the object structure for testability synthesis of digital circuits.

Block diagram of the test as an object of diagnostics of a digital device is suggested to submit formal graph model for the description of which the elements of set theory are used, which allows to identify the problem in the conducting of tests pathways controlled by signals and through the reorganization of the graph model, determines the requirements for the changes in device structure to increase its testability.

It is proved that the increasement of digital circuits testability can be achieved with a small increase of hardware complexity with combinational introduction of additional components.

Keywords: test diagnostics, digital devices, testability, graph model.

Вступ. Складність структури сучасних цифрових пристроїв (далі – ЦП) призводить до стрімкого збільшення витрат на розробку тестів для їх перевірки. Вартість розробки ефективного алгоритму тестування і його практичної реалізації досить часто перевищує витрати на розробку самого об'єкта діагностування (далі – ОД) [1].

Проведене дослідження характерних властивостей методів діагностування свідчить, що навіть за умов якісного фінансування далеко не завжди вдається розробити тестові послідовності для виявлення всіх можливих несправностей у структурі ЦП без її порушення. Побудова повних тестів на практиці стає можливою тільки для тестопридатних схем [2].

Постановка задачі. Забезпечення тестопридатності цифрових ОД потребує застосування спеціальних методів тестопридатного синтезу ще на етапі розробки їх електричних схем. Розробці методів тестопридатного синтезу електронних вузлів присвячено багато наукових робіт [3; 4; 5; 6; 7], але характерною особливістю таких методів є потреба в застосуванні якісних математичних моделей.

Вибір математичної моделі для задач тестопридатного синтезу є досить складним завданням і потребує урахування особливостей обраного методу, умов його застосування та переслідуваних цілей. З урахуванням сучасних тенденцій щодо застосування для вирішення задач тестопридатного синтезу інтелектуальних систем та експертних оцінок, найбільш зручними стають моделі високого ступеня систематизації описів та наочності представлення.

Очікувано ефективним для тестопридатного синтезу цифрових схем є застосування граф-моделі з описовою складовою в елементах теорії множин, основним призначенням якої є спрощення виявлення проблемних в проведенні тестових випробувань шляхів передачі контрольованих сигналів і визначення вимог щодо внесення змін у структуру пристрою для збільшення його тестопридатності. У роботі поставлено задачу демонстрації можливостей застосування граф-моделі на практиці.

Основна частина. Серед множини причин, що зумовлюють складність організації діагностичного процесу при перевірці ЦП, можна виділити ряд їх властивостей, які є найбільш суттєвими:

- наявність у структурі ОД елементів високого ступеня інтеграції;
- використання нестандартних елементів, реалізовуваних на програмованих структурах;
- надмірна централізація множини виконуваних функцій в окремих елементах (вузлах);
- функціональне різномаяття використовуваних елементів;

- використання способу комутації з підключенням елементів (вузлів) до загальних шин;
- наявність ліній з можливістю двонапрямленої організації передачі сигналів;
- складна організація топології міжелементних зв'язків;
- наявність обернених зв'язків в топології;
- відсутність можливості підключення до більшості сигнальних ліній міжелементних зв'язків;
- обмежена кількість точок контактування, доступних при реалізації діагностичних випробувань.

Розглянемо, для прикладу, структуру типового цифрового ОД з централізованою системою керування (рис. 1).

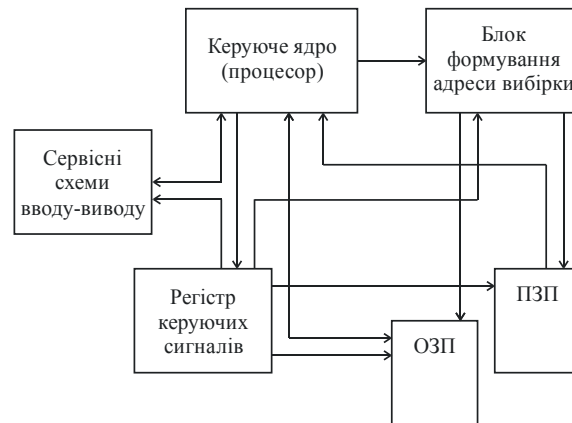


Рис. 1. Структурна схема досліджуваного ОД

За електричною структурною схемою можна виділити 6 вузлів у складі пристрою, що дає можливість сформувати відповідну множину структурних вузлів ОД $W: \{w_1, w_2, w_3, w_4, w_5, w_6\}$, $n=|W|=6$.

Для уявлення аналізу представимо ОД граф-моделлю (рис. 2).

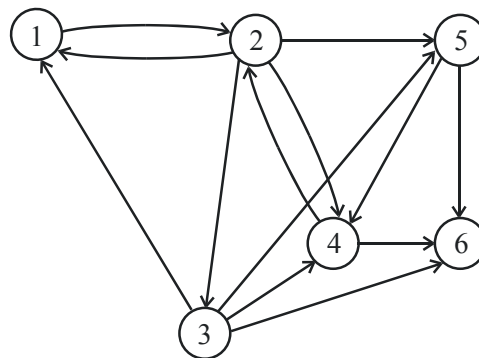


Рис. 2. Граф-модель досліджуваного ОД

В отриманому графі $G(V,U)$ також налічується 6 вершин, відповідних елементам множини структурних вузлів ОД $W: \{w_1, w_2, w_3, w_4, w_5, w_6\}$. Двонапрямлені зв'язки між вузлами ОД w_i в графі $G(V,U)$ замінено парами однонапрямлених зв'язків з протилежною орієнтованістю.

За аналогією з елементами множини структурних вузлів ОД $W: \{w_1, w_2, w_3, w_4, w_5, w_6\}$ нумеруємо відповідні вершини графу $V: \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6\}$.

За графом $G(V, U)$ визначаємо множину зв'язків між вузлами ОД $U: \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6, u_7, u_8, u_9, u_{10}, u_{11}, u_{12}\}$. Зазначені зв'язки u_j в графі $G(V, U)$ відповідають напрямкам передачі сигналів між вузлами w_i ОД: $u_1: w_1 - w_2$; $u_2: w_2 - w_3$; $u_3: w_2 - w_4$; $u_4: w_2 - w_5$; $u_5: w_3 - w_1$; $u_6: w_3 - w_4$; $u_7: w_3 - w_5$; $u_8: w_3 - w_6$; $u_9: w_4 - w_2$; $u_{10}: w_4 - w_6$; $u_{11}: w_5 - w_4$; $u_{12}: w_5 - w_6$.

Хоча запропонований ЦП, на перший погляд, структурно відрізняється простотою, для нього характерною є більшість з перелічених недоліків при його розгляді в якості ОД, що робить актуальною задачу модернізації схеми ЦП для збільшення його керованості і спостережуваності в процесі діагностування.

Для збільшення керованості і спостережуваності ЦП як ОД до його схеми вводяться спеціалізовані вузли комутації внутрішніх сигналів, які не впливають на роботу пристрою в номінальних режимах роботи, але дозволяють забезпечити можливість керованої комутації контрольованих сигналів на виходи схеми.

За графом логічної моделі діагностованого пристрою можна визначити перелік ліній зв'язків, доступ до яких для контролю за станом сигналів ускладнено. Для забезпечування спостережуваності значень сигналів на зазначених лініях у схему необхідно ввести додаткові елементи (схеми) комутації сигналів із зазначених ліній на контрольовані в діагностичному процесі вихідні контрольні точки $Q_{вих}: \{q_{вих 1}, q_{вих 2}, \dots, q_{вих i}, \dots, q_{вих s}\}$. Додаткові елементи (схеми) комутації сигналів на графі логічної моделі відображаються у вигляді додаткових вершин на відповідних лініях зв'язку. Водночас розуміється, що зазначені вершини не руйнують відповідні лінії зв'язків і залишаються прозорими для проходження сигналів (пропускають сигнали без змін), але забезпечують можливість зняття значень цих сигналів для їх передачі на вихідні контрольні точки ОД $Q_{вих}: \{q_{вих 1}, q_{вих 2}, \dots, q_{вих i}, \dots, q_{вих s}\}$.

У найбільш загальному і складному випадку вважається, що доступ для контролю за станом сигналів ускладнено для всіх внутрішніх ліній зв'язку, що не мають вихідних контактів (множини однотипних або двонапрямлених ліній можуть покриватися однією вершиною).

Модифікований відповідно до цього принципу граф логічної моделі досліджуваного ЦП зображено на рис. 3.

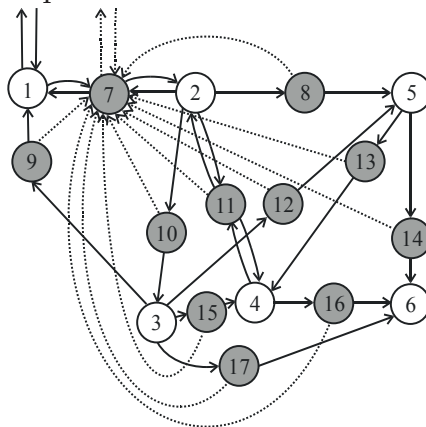


Рис. 3. Модифікована граф-модель досліджуваного ОД

Модифікований граф $G'(V, U')$ логічної моделі ОД доповнено 11 додатковими вершинами для комутації сигналів, що дає нам зміни в описі цього графу.

Множина вершин графу V' з урахуванням доповнень прийме вигляд $V':\{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6, v_7, v_8, v_9, v_{10}, v_{11}, v_{12}, v_{13}, v_{14}, v_{15}, v_{16}, v_{15}\}$, в якій можна виділити два типи вершин: вершини, що відповідають базовим блокам ОД $V_1':\{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6\}$, ($V_1=V$), і вершини, що відповідають нововведеним комутаційним блокам $V_2':\{v_7, v_8, v_9, v_{10}, v_{11}, v_{12}, v_{13}, v_{14}, v_{15}, v_{16}, v_{15}\}$, $V_1' \cup V_2' = V_2'$, $V_1' \cap V_2' = \emptyset$.

Слід зазначити, що одна або декілька вершин графу $G'(V', U')$ повинні відігравати роль комутаційних для спряження з засобами діагностування. До таких вершин належить будь-яка вершина з множини $V':\{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6, v_7, v_8, v_9, v_{10}, v_{11}, v_{12}, v_{13}, v_{14}, v_{15}, v_{16}, v_{15}\}$, у складі якої передбачено наявність хоча б однієї контрольної точки з множини контрольних точок ОД $Q_{км}:\{q_1, q_2, \dots, q_r, \dots, q_p\}$. Якщо вершини графу $G'(V', U')$, відповідні вузлам ОД з контрольними точками $q_i \in Q_{км}$, містять контрольні точки з множини виходів ОД $Q_{вих}:\{q_{вих 1}, q_{вих 2}, \dots, q_{вих r}, \dots, q_{вих s}\}$, то зазначені вершини можуть використовуватись як цільові для транспортування на них ознак несправностей, характерних для станів $L^B:\{l_1^B, l_2^B, \dots, l_i^B, \dots, l_{v-1}^B\}$.

В отриманому графі $G'(V', U')$ роль комутаційних для спряження з засобами діагностування відіграють вершини (тобто відображені цими вершинами блоки) $v_1 \in V'$ і $v_7 \in V'$, при чому вершина відповідає базовій вершині комутаційних засобів ОД, а вершина – додана комутаційна вершина. За більш детальним аналізом властивостей ОД склад комутаційних для спряження з засобами діагностування вершин може змінюватись. В ідеальному варіанті до складу комутаційних для спряження з засобами діагностування вершин повинні входити лише вершини $v_i \in V'$, належні початковому графу $G(V, U)$ – це є ознакою можливості реалізації тестопридатного синтезу з використанням доступних контрольних точок ОД з початкової множини $Q_{км}:\{q_1, q_2, \dots, q_r, \dots, q_p\}$ без введення додаткових контактів.

Після визначення складу і характеру вершин множини V' необхідно провести аналіз модифікації зв'язків в графі $G'(V', U')$.

Оскільки введені додатково комутаційні блоки $V_2':\{v_7, v_8, v_9, v_{10}, v_{11}, v_{12}, v_{13}, v_{14}, v_{15}, v_{16}, v_{15}\}$ не руйнують відповідні лінії зв'язків і залишаються прозорими для проходження сигналів, множина базових зв'язків $U:\{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6, u_7, u_8, u_9, u_{10}, u_{11}, u_{12}\}$ між вузлами ОД залишається незмінною. Загальна ж кількість зв'язків у графі $G'(V', U')$ порівняно з графом $G(V, U)$ збільшується.

З модифікованого графу $G'(V', U')$ визначаємо перелік нових зв'язків, які з'явилися після доповнення графу $G(V, U)$ комутаційними вершинами (зображені на схемі вхідні і вихідні лінії пристрою не враховуємо). Таких зв'язків 10 (на схемі вони зображені пунктиром, позначаємо їх $u_{13}-u_{22}$): $u_{13}-w_8-w_7$; $u_{14}-w_9-w_7$; $u_{15}-w_{10}-w_7$; $u_{16}-w_{11}-w_7$; $u_{17}-w_{12}-w_7$; $u_{18}-w_{13}-w_7$; $u_{19}-w_{14}-w_7$; $u_{20}-w_{15}-w_7$; $u_{21}-w_{16}-w_7$; $u_{22}-w_{17}-w_7$. Як наслідок, отримуємо оновлену множину внутрішніх зв'язків ОД $U':\{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6, u_7, u_8, u_9, u_{10}, u_{11}, u_{12}, u_{13}, u_{14}, u_{15}, u_{16}, u_{17}, u_{18}, u_{19}, u_{20}, u_{21}, u_{22}\}$.

З графу чітко видно спрямованість додатково введених внутрішніх зв'язків $u_{13}-u_{22}$ до вершини w_7 , яку обрано як основну комутаційну вершину для видачі контрольованих сигналів з ОД на засоби діагностування. Якщо в структурі ОД визначається наявність блоків, які є зручними для зчитування векторів відповідних реакцій з множини $R^i:\{r_1^i, r_2^i, \dots, r_j^i, \dots, r_c^i\}$, то частина або всі комутаційні зв'язки доцільно спрямовувати до них. У будь-якому разі введення комутаційних блоків (вершин графу) для спряження з засобами діагностування і додаткових контрольних точок у структурі ОД доцільно максимально обмежувати.

Також слід зауважити, що доповнення графу $G(V,U)$ комутаційним блоком $V_2':\{v_7, v_8, v_9, v_{10}, v_{11}, v_{12}, v_{13}, v_{14}, v_{15}, v_{16}, v_{15}\}$ не є ознакою значного збільшення апаратної складності ЦП. Оскільки вершини $v_i \in V_2'$ відображують комутаційні вузли комбінаційного типу, їх загальна складність порівняно з іншими вузлами ОД може бути досить малою. Крім того, кількість вершин множини V_2' може зменшуватись в процесі тестопридатного синтезу за рахунок злиття сумісних комутаційних блоків $v_i \in V_2'$ між собою або з блоками $v_j \in V$. Загалом усю множину додаткових вершин $V_2':\{v_7, v_8, v_9, v_{10}, v_{11}, v_{12}, v_{13}, v_{14}, v_{15}, v_{16}, v_{15}\}$ можна розглядати як єдине поле комутації сигналів (у багатьох випадках воно реалізується у вигляді єдиного програмованого елемента в структурі ОД).

Подальший процес синтезу тестопридатних ЦП зводиться до двох задач:

- 1) розробка комбінаційної схеми для комутації застосовуваних у схемі сигналів, що є функціонально адаптованою для реалізації контролю за роботою як базової частини пристрою, так і додатково введеної комутаційної частини;
- 2) оптимізація складу застосовуваних у процесі діагностування контрольних точок.

Висновки. Проведені дослідження свідчать, що граф-моделі з описовою складовою в елементах теорії множин можуть бути ефективним інструментом у виявленні проблемних у проведенні тестових випробувань шляхів передачі контрольованих сигналів і визначенні вимог (через реорганізацію граф-моделі) щодо внесення змін у структуру пристрою для збільшення його тестопридатності. Збільшення тестопридатності цифрових схем може бути досягнуто при незначному збільшенні їх апаратної складності введенням додаткових комбінаційних складових.

Слід зазначити, що для зменшення негативних наслідків реорганізації схем ЦП у ході вирішення задачі збільшення тестопридатності виникає необхідність не просто ввести до структури пристрою окремі вузли комутації, а реорганізувати структуру таким чином, щоб максимально задіяти для спрощення діагностичних експериментів функціональні можливості наявних у схемі елементів безпосередньо або шляхом їх заміни на інші без шкоди для пристрою. Зазначена задача відрізняється складністю і не має однозначних алгоритмів отримання рішень, що зумовлює актуальність подальших наукових досліджень у цьому напрямі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Технические средства диагностирования: Справочник / В.В. Ключев, П.П. Пархоменко, В.Е. Абрамчук и др./ Под общ. ред. В.В. Ключева. – М. : Машиностроение, 1989. – 672 с.
2. Діагностика цифрових та аналогових пристроїв радіоелектронної техніки : монографія / Вишнівський В.В., Жердев М.К., Ленков С.В., Проценко В.О. ; під редакцією М.К. Жердева, С.В. Ленкова. – К. : Знання України, 2009. – 220 с.
3. Гроль В.В. Синтез контролепригодных цифровых схем / В.В. Гроль. – М. : ИСМО, 1996. – 105 с.
4. Romankevich A. On Digital Circuits Checkability under Pseudo Random Testing / A. Romankevich, V. Groll // XII International Conf. on Fault Tolerant Systems and Diagnostics. – Praha. – 1989. – P. 217–218.
5. Stroud C.E. A Designer's Guide to Built-in Self-Test / C.E. Stroud. – Kluwer Academic Publishers. – 2002. – 319 p.
6. Matrosova A. Easy Testable Combinational Circuit Design / A. Matrosova, V. Andreeva, S. Ostanin // Proc. The 6th International Workshop on Boolean Problems. Freiberg, 2004. – P. 237–244.
7. J. Lo. The design of fast totally self checking Berger checkers based on Berger code partitioning / J. Lo., S. Thanawastien // Proc. 18-th Int. Symposium Fault-Tolerant Computing. – 1988. – P. 226–231.

Отримано 26.05.2016

Рецензент Рибальський О.В., д.т.н.