

УДК 681.518

С. І. ПЕРЕВОЗНИКОВ, І. Р. АРСЕНЮК, В. С. ОЗЕРАНСЬКИЙ

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

**ФОРМУВАННЯ КОМПОНЕНТНИХ СТРУКТУР ТЕСТУВАННЯ ЦИФРОВИХ ПРИСТРОЇВ НА ОСНОВІ ЇХ ГРАФОВОГО ПРЕДСТАВЛЕННЯ**

**Анотація.** В статті розглядається питання формалізації процесів побудови компонентних структур для систем внутрішньосхемного діагностування цифрових пристроїв, зокрема, формування фрагментів розбиття. Введено і обґрунтовано математичну модель на основі апарата теорії графів. Дано визначення основним елементам структур фрагментів та їх взаємовідношень. Запропоновано додаткові характеристики розбиття на основі моделювання елементами структур, в процесі формування компонентів показано їх взаємозалежність. Встановлено тісний зв'язок глибини діагностування цифрового пристрою з результатами коригування структур розбиття: при визначених параметрах декомпозиції в деяких випадках порушується точність вказування місця несправності. В статті дано аналіз і знайдені формальні умови запобігання таких випадків.

**Ключові слова:** структура, декомпозиція, діагностування.

**Анотация.** В статье рассматривается вопрос формализации процессов построения компонентных структур для систем внутрисхемного диагностирования цифровых устройств, в частности, формирование фрагментов разбиений. Введено и обосновано математическую модель на основе аппарата теории графов. Дано определение основных элементам структур фрагментов и их взаимоотношений. Предложено дополнительные характеристики разбиений на основе моделирования элементами структур, в процессе формирования компонентов показано их взаимозависимость. Установлена тесная связь глубины диагностирования цифрового устройства с результатами корректировки структур разбиения: при определенных параметрах декомпозиции в некоторых случаях нарушается точность указания места неисправности. В статье дан анализ и найдены формальные условия предотвращения таких случаев.

**Ключевые слова:** структура, декомпозиция, диагностирование.

**The Abstract.** The paper discusses the formalization process of building a component structure for systems in-circuit diagnostics of digital devices, in particular, the formation of fragments of partitions. Introduction, but reasonably based on a mathematical model of the theory of graphs. A definition of the basic structural elements and their fragments relations. Proposed additional characteristics of partitions based on the modeling elements of structures in the formation of the components shown in their interdependence. The close relationship of depth diagnostic digital device with the results of adjusting the structures of the partition: the decomposition of certain parameters in some cases disrupted the accuracy of fault location instructions. This article provides an analysis and found of formal terms of preventing such cases.

**Keywords:** structure, decomposition, diagnostic.

**Вступ**

Апаратно-програмні засоби діагностування сучасних цифрових пристроїв (ЦП) базуються на відомих підходах, які передбачають, наприклад, додаткове введення до складу пристроїв спеціальних елементів, які саме і організують процеси тестування (boundary-scan), автоматичне переміщення контактних шупів між внутрішніми контрольними точками (КТ) (flair probe), а також контактних матриць з підпружиненими голками. Всі підходи в достатній мірі мають як переваги, так і певні недоліки. Таке становище залишає право обґрунтування і вибору сполучень підходів для підвищення ефективності апаратних засобів [1]. Так, при достатній кількості контактних голок, які використовуються в системах покомпонентного діагностування ЦП, можуть реалізовуватись декомпозиційні і композиційні методи пошуку несправностей. Перспективність такого напрямку тестування пояснюється значним спрощенням пошукових процедур та існуванням бібліотечних тестів, які найбільш пристосовані для конкретних задач діагностування. Формування компонентних структур на основі їх пофрагментного перетинання дає можливість досягти максимальної глибини діагностування, заощаджуючи, при цьому як час підготовки пошукових процедур, так і безпосереднє тестування сформованих структур.

**Актуальність**

Аналіз процесів формування різних структур розбиття та особливостей їх міжкомпонентних відносин дає можливість удосконалити існуючий метод їх комп'ютерного моделювання з метою підвищення інтелекту процедур діагностування. Це відкриває перспективи щодо організації швидкоореалізуючих програм тестування. При цьому слід відмітити, що питання аналізу алгоритмічного забезпечення щодо моделювання і впливу відповідних характеристик розбиття на властивості компонентних структур процесів діагностування несправностей ЦП, є недостатньо дослідженими. Тому тема статті, що присвячена розв'язанню подібних задач, є актуальною.

**Мета досліджень**

Метою дослідження є автоматизація процесів діагностування цифрових пристроїв на етапі їх виробництва шляхом удосконалення методів формування компонентних структур на основі їх пофрагментного перетинання. Це дає можливість досягти максимальної глибини діагностування, заощаджуючи загальний час пошуку несправностей.

**Постановка задачі**

При виробництві сучасного електронного обладнання особливе місце займає розробка друкованих плат. З урахуванням темпів і тенденцій розвитку сучасного виробництва особливого значення у цьому

плані набувають питання автоматизації процесів виявлення і пошуку несправностей, що виникають на виробництві при серійному або масовому виготовленні цифрових пристроїв.

Як показує світова практика, особливе місце при цьому займають системи внутрішньосхемного діагностування, які найбільш успішно зарекомендували себе при середніх та великих обсягах виробництва ЦП. Такі системи характеризуються простотою виконання та мобільністю налаштування на постійні зміни типів об’єктів тестування. При цьому немає необхідності вносити до складу пристроїв додаткову апаратуру контролю. Вони не вимагають розроблення спеціальних правил проектування і управління тестуванням елементів схем. Орієнтованість засобів такого класу на виробництво дозволяє виявляти переважну кількість несправностей з максимальною глибиною пошуку, що досягається можливістю конструктивного доступу до внутрішніх контрольних точок друкованих плат [1].

Однією із задач, які потрібно при цьому розв’язати, є задача розбиття схем ЦП на певні складові частини (компоненти). Аналіз показав, що найбільш зручним апаратом відображення особливостей компонентних структур цифрових пристроїв в задачах їх формування є графові моделі, зокрема, гіперграфи.

Таким чином, задачі декомпозиції схем ЦП формально зводяться до задач декомпозиції графів. Але при цьому не існує стандартного методу розбиття графів, які застосовуються під час опису схем для їх тестування. Наприклад, такі методи, як метод Баранова, метод Закревського, метод повного перебору, паралельно-послідовний метод використовують для декомпозиції існуючих (заданих) графів, та спрямовані на оптимізацію міжблокових зв’язків [2].

Метод, який пропонується в даній статті, базується на формуванні ряду, що містить складність і кількість компонентів та відповідає умовам коректності розбиття схем ЦП із заданою глибиною діагностування. З’ясовано, що процес розбиття графу містить прихований механізм втрати глибини тестування, що негативно впливає на прийняття рішень про наявність несправностей в схемі ЦП.

Задачею даної статті є виявлення необхідного співвідношення параметрів представлення компонентних структур в процесі їх алгоритмічного перетворення для усунення ситуації зменшення глибини діагностування цифрових пристроїв.

#### Розв’язання задачі

Будь яку структуру можна представити у вигляді  $G^*(V^*, E^*)$ , де  $V^* = \{v_i | i \in \overline{1, n}\}$  – множина вершин, що відповідають елементам пристрою на принциповій схемі, а  $E^* = \{e_j^* | j \in \overline{1, m}\}$  – множина дуг, що відображають зв’язки між елементами. Формування будь-якої компонентної структури схеми пристрою, як правило, виконується за умов певних фізичних обмежень та формальних критеріїв і закінчується перетворенням вихідного графа  $G^* \rightarrow G$ , де  $G(V, E)$  – гіперграф, для кожного ребра якого  $e_i \in E$  можна поставити у відповідність один із сформованих фрагментів схем  $G = \{G_1, G_2, \dots, G_p\}$ ,  $|E|=p$ , при відповідній умові їх об’єднання  $\bigcup_{i=1}^p V_i = V$ . При цьому структура розбиття графа  $G$  повинна відповідати ряду вимог і обмежень [3, 4].

Слід відзначити, що характер декомпозиції вершин графа  $G^* \rightarrow G$  повинен мати нетривіальний вид. Для його елементів повинна виконуватись умова  $(\forall G_i \in G)(V_i \neq \{\emptyset\})$ , де  $i \in \overline{1, p}$ , де  $p$  – число сформованих компонентів розбиття структури вихідного графа  $G^*$ .

Під ступенем декомпозиції цифрового пристрою будемо розуміти число  $p$  компонентів розбиття його вихідної структури, що покривають множину  $V^*$  елементів ЦП. Склад множини  $G$  і особливості взаємного перетинання підмножин її елементів визначають глибину з якою здійснюється пошук несправностей у різних пристроях згідно спрямованості процесу діагностування [3].

Під компонентною глибиною діагностування ЦП будемо розуміти число  $\lambda$ , що відповідає потужності сформованої множини  $\tilde{V} (\tilde{V} = \{\tilde{V}_i \in V | (\forall \tilde{V}_i)(\exists G_k \in G)(\tilde{V}_i \subset V_k)\})$  фрагментів розбиття, де  $(\forall \tilde{V}_i, \tilde{V}_j \in \tilde{V})(\tilde{V}_i \cap \tilde{V}_j = \{\emptyset\})$ , а також  $\bigcup_{i=1}^{\lambda} \tilde{V}_i = V$  де  $i, j, k \in \overline{1, p}$ , що утворені процесом декомпозиції ступеня  $p$  елементів вихідної структури ЦП.

Для компонентних структур  $\lambda$ -розбиттів [3] вершин графа  $G^*$  (при  $i \neq j$ , де  $i, j \in \overline{1, p}$ , а також  $V_{ij} = V_i \cap V_j$ ), виконується умова:

$$(\forall G_i, G_j \in G)((V_i \neq V_j) \Rightarrow ((V_{ij} = \{\emptyset\}) \vee (|V_{ij}| = 1))) \quad (1)$$

Якщо для пари компонентів  $G_i, G_j \in G$  (де  $i, j \in \overline{1, p}$ )  $\lambda$ -розбиттів вершин графа  $G^*$  виконується нерівність  $V_{ij} \neq \{\emptyset\}$ , то справедливо висловлювання  $(\exists k \in \overline{1, p}) (V_{ij} \cap V_k \neq \{\emptyset\})$ , де  $i \neq j \neq k$ .

Як вказано в [3], для будь-якого фрагмента  $G_i \in G$ , при  $\lambda$ -розбитті вершин графа  $G^*$  з параметрами  $\langle p, \Delta, \delta \rangle$ , виконується умова  $\delta \in \{0, 1\}$ , а також  $(\exists G_i, G_j \in G) ((G_i \subset G_j) \vee (G_j \subset G_i))$ , де  $i, j \in \overline{1, p}$ . При цьому основні характеристики декомпозиції будь-якого ЦП зв'язані залежностями: [3]

$$\lambda = p + \Delta - \delta, \quad t = a_2 - \delta_2, \quad s = \Delta - a_2$$

де  $\delta$  - загальне число неповних компонентів розбиття,  $\Delta$  - число перетинів компонентів,  $a_2$  - загальне число простих компонентів,  $\delta_2$  - число неповних (простих) фрагментів схем.

Приведемо ряд визначень для типів фрагментів і деяких компонентних утворень  $\lambda$ -розбиття, а також їх характеристики [3].

Під неповним ( $\delta > 0$ ) компонентом будемо розуміти фрагмент розбиття, який не має ( $\Delta = 0$ ) спільного елемента з іншими фрагментами розбиття.

Під повним ( $\delta = 0$ ) компонентом будемо розуміти фрагмент розбиття, який має ( $\Delta \neq 0$ ) спільний елемент з іншими фрагментами розбиття.

Під термінальним компонентом будемо розуміти двоелементний повний фрагмент ( $t$ ), який входить до складу будь-якого НПЛ.

Під ізольованим компонентом будемо розуміти фрагмент з одним елементом із загальної кількості  $\lambda$  множини вихідних елементів.

Під складним компонентом будемо розуміти  $i$ -тий фрагмент розбиття, число елементів якого складає  $|V_i| \geq 3$ .

Під простим компонентом будемо розуміти  $i$ -тий фрагмент розбиття, число елементів якого складає  $|V_i| \leq 2$ .

Послідовність простих компонентів, що зв'язують складні фрагменти, назвемо внутрішнім простим ланцюгом (ВПЛ).

Ланцюг простих компонентів, що зв'язує складний і термінальний компоненти назвемо напівпростим ланцюгом (НПЛ).

Моделювання структур розбиття графа  $G$  (з метою оптимізації) зручно здійснювати на основі  $\alpha$ -операцій [3]. При цьому формуються процеси коригування графа.

**ST-процесом** будемо вважати послідовність  $\alpha$ -операцій переміщення простих компонентів із  $s$ -ланцюгів в  $t$ -гілки графа  $G$ .

**TS-процесом** будемо вважати послідовність  $\alpha$ -операцій переміщення простих компонентів із  $t$ -гілок в  $s$ -ланцюги графа  $G$ .

TS-процес має центробіжний напрямок переміщення простих компонентів, з якими пов'язано усунення термінальних гілок. Максимізація або мінімізація числа термінальних компонентів пов'язані з ST- або TS-процесами при незмінних параметрах самого розбиття.

Приклад компонентної структури наведено на рис. 1. Для такого варіанта розбиття маємо глибину діагностування  $\lambda = 32$ , а також сформовані підструктури компонентів:  $G_{\Pi} = \{G_2, G_3, G_4, G_5, G_7, G_8, G_9, G_{10}, G_{11}, G_{12}, G_{13}, G_{15}, G_{16}, G_{18}, G_{20}\}$  - неповні,  $G_{\Pi} = \{G_1, G_{14}, G_{17}\}$  - повні,  $G_T = \{G_6, G_{19}\}$  - термінальні, а ізольований фрагмент розбиття представлено, як  $G_{\Pi} = \{G_{21}\}$ .

При розбитті графа  $G$  з параметрами  $\langle p, \Delta, \delta \rangle$  число  $t^*$  термінальних компонентів знаходиться в межах [4]

$$t_{max} = t + \min\{a - \delta_a, \delta_2\} \geq t^* \geq t_{min} = t - \min\{\delta_a, a_2 - \delta_2\},$$

де  $t$  - поточне число термінальних компонентів, яке задається при генерації параметрів декомпозиції графа  $G$ ,  $a$  - число складних компонентів розбиття ( $p = a + a_2$ ).

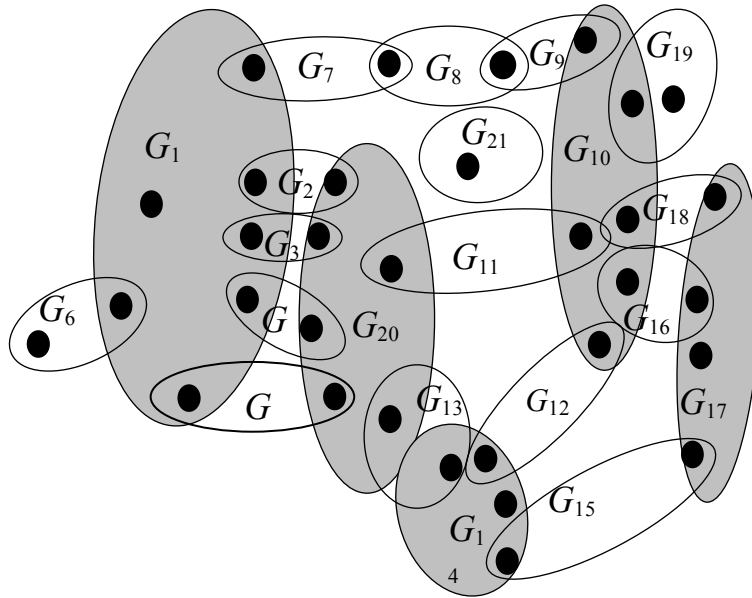


Рисунок1 – Граф компонентної структури

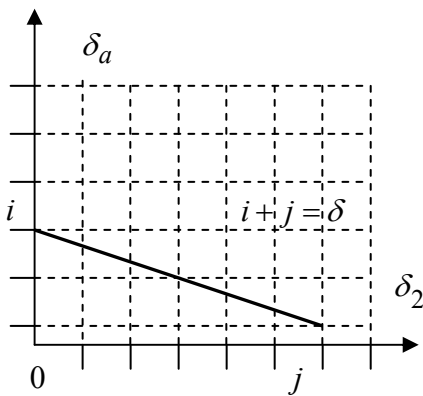
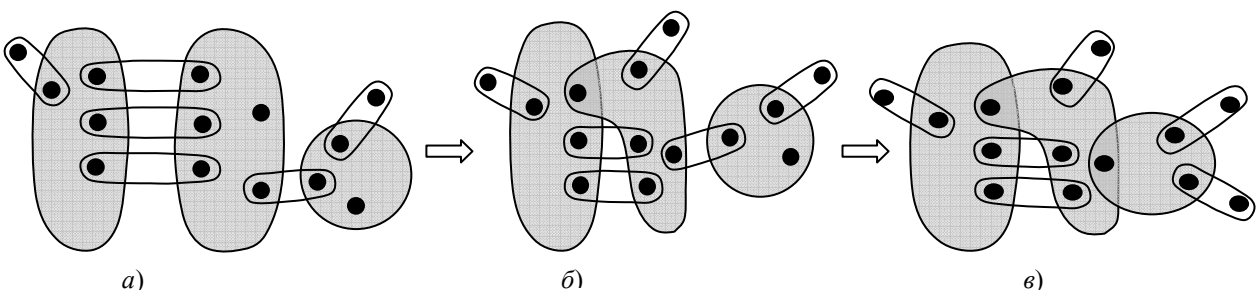


Рисунок 2 – Взаємозалежність показників повноти компонентів

При цьому слід відмітити, що характеристики повноти компонентів ( $\delta_a^3 \delta_2$ , де  $\delta = \delta_a + \delta_2$ ) представляють собою взаємозалежні величини, приклад яких показано на рис. 2. Приклад покрокового формування (при  $\lambda = 14$ ) максимального числа термінальних гілок ( $t_{max}$ ) структури розбиття графа G приведено на рис. 3. Але аналіз поетапного перетворення вихідних структур показав, що можуть існувати приховані ситуації, які пов'язані зі зменшенням глибини діагностування ЦП.

Це пояснюється порушенням умови (1) компонентних відносин при перетворенні вихідного графа: з'являється перетин компонентів, який містить два або більше спільних елементів. На рис. 4 показано такий поетапний процес формування термінальних гілок.



$$t_{max} = 2 + \min\{3-1, 6\} = 2 + 2 = 4$$

Рисунок 3 – Формування максимального числа термінальних гілок

При остаточному перетворенні графу G створюється двократне перетинання складних компонентів, що впливає на точність діагностування. Аналогічну ситуацію можна спостерігати і на рис. 5. Але умови, що коригують таку ситуацію, існують. В даній структурі процес пошуку чотирьох термінальних гілок необхідно припинити на другому кроці перетворення вихідного графа G (при  $t = 3$ ).

При розбитті графа G з параметрами  $\langle p, \Delta, \delta \rangle$  число ( $t_{max}$ ) термінальних компонентів визначається обмеженням:

$$\delta_2 > s - s', \quad (2)$$

де  $s'$  - число вироджених (безпосередніх) перетинань складних компонентів ( $s' = 1$  для кожної такої пари).

Формування термінальних гілок здійснюється послідовністю  $\alpha$ -операцій (ST-процес). На кожному кроці ST-процесу зменшується на одиницю значення  $\delta_2$  і формується одна термінальна гілка. Відомо, що між будь-якими двома складними компонентами число безпосередніх перетинів не повинно перевищувати одиниці. Загальне число зв'язків між кожною парою зв'язаних складних компонентів складає  $S$  (як результат розбиття).

Слід відмітити, що в процесі перетворення вихідного графа схеми ЦП повинні аналізуватися дві умови: перша – досягнення максимального значення числа термінальних компонентів [4], друга – виконання обмеження (2). Процес перетворення для аналізованої пари складних компонентів припиняється при досягненні хоча б однієї з них.

Так, наприклад, для структури, що представлена на рис. 3, процес перетворення складається з 2-х кроків.

На початку (рис. 3а) фіксуємо:  $t_{\max} = 4$ , а  $t = 2$ , при умові (2)  $3 > 2$ .

На першому кроці (рис. 3б) маємо:  $t_{\max} = 4$ , а  $t = 3$ , при умові (2)  $2 = 2$ . Зупиняємо перетворення, і переходимо до іншої пари зв'язаних між собою складних компонентів.

На другому кроці (рис. 3в) маємо:  $t_{\max} = 4$ , а  $t = 4$ , при умові (2)  $1 > 0$ . Припиняємо перетворення структури (при досягненні  $t_{\max}$ ).

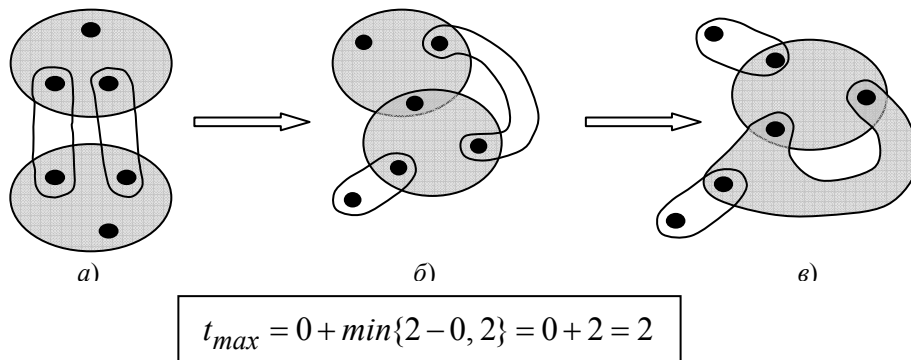


Рисунок 4 – Зменшення глибини діагностування при формуванні максимального числа термінальних гілок

Для структури, що представлена на рис. 4, процес перетворення складається теж з 2-х кроків.

На початку (рис. 4а) фіксуємо:  $t_{\max} = 2$ , а  $t = 0$ , при умові (2) маємо  $2 > 1$ .

На першому кроці (рис. 4б) маємо:  $t_{\max} = 2$ , а  $t = 1$ , при умові (2) маємо  $1 = 1$ . Припиняємо перетворення структури (порушення обмеження (2)).

Якщо процес перетворення продовжити, то реалізується подвійний перетин складних компонентів, що призведе до втрати глибини діагностування (рис. 4в).

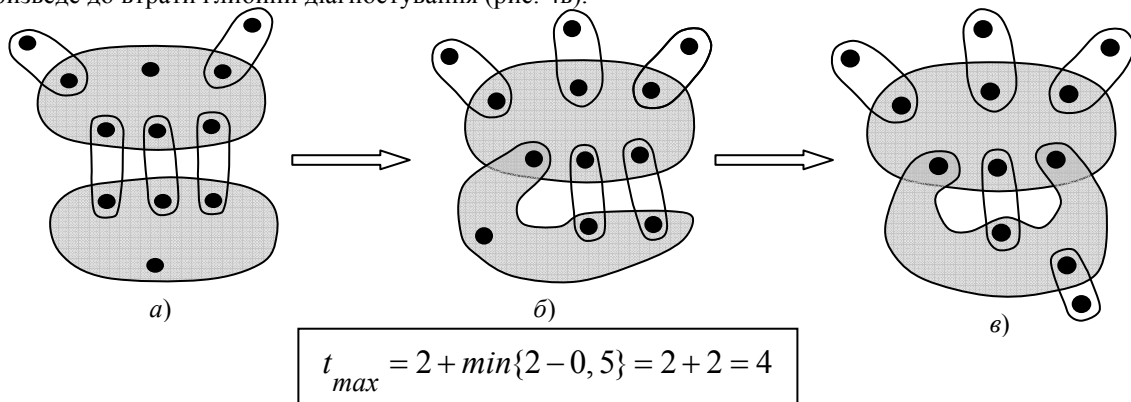


Рисунок 5 – Приховане зменшення глибини діагностування

Для структури, що представлена на рис. 5, процес перетворення складається теж з 2-х кроків.

На початку (рис. 5а) фіксуємо:  $t_{\max} = 4$ , а  $t = 2$ , при умові (2) маємо  $3 > 2$ .

На першому кроці (рис. 5б) маємо:  $t_{\max} = 4$ , а  $t = 3$ , при умові (2) маємо  $2 = 2$ . Припиняємо перетворення структури (порушення обмеження (2)).

Якщо процес перетворення продовжити, то реалізується подвійний перетин складних компонентів, що призведе до втрати глибини діагностування (рис. 5в).

#### Висновки

Формування повних компонентів доцільно пов'язувати з тим, що ядра в таких структурах ставляться у відповідність елементам, які мають відносно тривалий час тестування і перевіряються в останню чергу або рішення приймається способом виключення (без їх тестування). Існування термінальних гілок ефективно коли тести елементів, що їх утворюють, узгоджені між собою по входах і виходах. Прикладом такої структури є послідовність тригерів (реєстри). Але при перетворенні таких штучних структур можливі випадки, коли з'являється перетин компонентів, який містить два або більше спільних елементів. Це призведе до зменшення глибини діагностування ЦП через те, що такі елементи не можуть бути вірно протестовані. У статті пропонується розв'язання даної задачі введенням умови обмеження максимального числа термінальних гілок при перетворенні структур розбиття вихідного графа схеми ЦП.

#### Література

1. Ами Городецкий. Снова о внутрисхемном тестировании // Компоненты и технологии. – №7. – 2011. – С. 57 – 59.
2. Батищев Д.И., Старостин Н.В. Задачи декомпозиции графов. Н.Новгород, ННГУ, 2001.
3. Перевозников С. І., Очкуров М. А., Озеранський В. С. Стратегії прискореного діагностування цифрових схем // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – №1 (11). – 2008. – С. 44 – 55.
4. Перевозников С. І., Озеранський В. С., Снігур А. В. Алгоритмічні основи і критерії формування компонентних структур діагностування цифрових пристроїв // Вісник ВПІ. - №5. – 2008. – С. 56 – 61.

#### Відомості про авторів

**Перевозников Сергій Іванович** – д. т. н., професор кафедри комп'ютерних наук, Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021, Україна. Тел. (0432) 51-32-11, e-mail: perevoznikov@ukr.net .

**Озеранський Володимир Сергійович** – аспірант кафедри комп'ютерних наук, Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021, Україна. Тел. (0432) 54-72-47.

**Арсенюк Ігор Ростиславович** – к. т. н., доцент кафедри комп'ютерних наук, Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021, Україна. Тел. (0432) 51-32-11.