

УДК 681.326

DOI: 10.20998/2411-0558.2023.01.07

М. А. МІРОШНИК, д-р техн. наук, проф., Харківський національний університет ім. Каразіна, м. Харків,
О. С. ШКІЛЬ, канд. техн. наук, доц., проф., Харківський Національний університет радіоелектроніки, м. Харків,
Д. Ю. ПАХЛІС, канд. техн. наук, доц., Харківський Національний університет радіоелектроніки, м. Харків,
А. М. МІРОШНИК, асп., Харківський Національний університет радіоелектроніки, м. Харків,
Д. А. ЛОБОЙЧЕНКО, магістр, Харківський Національний університет радіоелектроніки, м. Харків

МЕТОДИ ПОБУДОВИ ТЕСТІВ ДЛЯ ІНТЕРАКТИВНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖ НА СТРУКТУРНО-ЛОГІЧНОМУ РІВНІ

Розроблено методи синтезу перевіряючих послідовностей інтерактивних комп'ютерних мереж з використанням циклічних, відмінних і характеристичних символів автоматної моделі комірки мережі. Розроблено та обґрунтовано новий метод модифікації автоматної діаграми комірки, яка не має відмінної послідовності і передбачає введення додаткового вхідного символу та використання кодів станів, що породжує Гамільтонів цикл у послідовності переходів. Розроблено методи та процедури синтезу одновимірних і двовимірних мереж з розподіленим управлінням конфігурацією. Іл.: 1. Бібліогр.: 10 назв.

Ключові слова: діагностичний експеримент; інтерактивна комп'ютерна мережа; одновимірна і двовимірна мережа, перевіряюча послідовність; комірка; додатковий вхідний символ.

Аналіз структур та тенденцій розвитку інтерактивних комп'ютерних мереж. Широке застосування елементної бази NoC, SoC і ПЛІС FPGA при проектуванні комп'ютерних систем (КС) дало поштовх численним дослідженням щодо створення одновимірних та двовимірних інтерактивних комп'ютерних мереж (ІКМ) з конструктивними властивостями архітектурно-структурної однорідності, тестопридатності, самоперевірюваності, високої продуктивності та реактивності [1]. Просторова розподіленість конфігурованих логічних блоків (КЛБ) FPGA; паралелізм їх функціонування та можливість програмної реконфігурації сполук та налаштувань КЛБ визначили інтерес дослідників до реалізації КС у вигляді ІКМ [2, 3].

Розвиток математичної теорії однорідних структур у КС для паралельної обробки інформації шляхом паралельного виконання

обчислювальних алгоритмів у поєднанні із сучасними досягненнями субмікронних технологій в електронній промисловості дає **актуальність** та перспективи побудови діагностичної інфраструктури на ІКМ [4 – 5].

Ціллю статті є розробка та обґрунтування нового методу модифікації автоматних діаграм комірок, розробка процедури синтезу одномірних і двомірних мереж з розподіленим управлінням конфігурацією.

ІКМ є впорядкованим масивом однорідних функційних модулів (ФМ) у n -мірному просторі, в якому кожен модуль або клітина має обмежену множину станів, а перехід з одного стану в інший визначається набором правил або функцією переходів ФМ, відповідно до якої будь-який модуль мережі обчислює свій новий стан на кожному такті функціонування мережі. Структура ФМ ІКМ ідентична структурі КЛБ FPGA і тому будь-яка мережа з довільними правилами функціонування та еволюцією може бути конфігуровано у структурі ПЛІС. ІКМ, всі ФМ-клітини якої налаштовані за одним правилом, називають однорідною ІКМ (ОІКМ), в іншому випадку вона називається гібридною ІКМ (ГІКМ) [6].

Наразі ІКМ популярні серед вітчизняних та закордонних дослідників, які досліджують властивості мереж. В [7, 8] представлено та проаналізовано найбільш поширену трирівневу магістральну архітектуру КС та її компоненти, а також структуру фреймів неінтерактивних та ІКМ і систем. В [9] показано як інтерактивні моделі руху даних застосовуються в КС реального часу, та показано які існують інтерфейсні виконавчі механізми мікропроцесорних систем автоматизації виробничих процесів. Аналіз існуючих методів проектування відмовостійких систем на основі розподілених ІКМ (РІКМ) показує, що знаходять широке застосування два підходи: 1) запровадження та використання апаратної надлишковості у вигляді резервних модулів (РМ) ФМ, де РМ замінюють несправні; 2) виключення несправних ФМ із РІКМ із деградацією її продуктивності в допустимих межах (Degradable Arrays). Проблема побудови двомірних РІКМ, що деградують, у яких використовуються чотиріпортові комутатори є NP-повною. Надзвичайно складно маршрутизувати ДІКМ одночасно по рядкам і стовпцям. Було запропоновано алгоритм реконфігурації, у якому маршрутизація справних ФМ рядками і стовпцям здійснюється обмеженого за розмірністю і площі ділянки двовимірної мережі, та велику кількість алгоритмів, що мінімізують час реконфігурації, енергетичні витрати. Відсутність доступу до внутрішніх модулів мережі ускладнює процедуру генерації тестових наборів, оцінки їхньої ефективності та пошуку несправного модуля. Тому виникає завдання модифікації структур ІКМ, що забезпечило б підвищення

ефективності процедур тестового діагностування ІКМ, та розробки методів синтезу перевіряючих послідовностей, які дозволяють виключити трудомісткі процедури моделювання виявлених несправностей [10].

Синтез перевіряючої послідовності за тестовим графом функціональної комірки ІКМ. Розроблено методи синтезу перевіряючих тестів ІКМ, функціональні модулі яких не мають виходів, що спостерігаються, а функціонування представляється моделями кінцевих детермінованих автоматів. Методи синтезу перевіряючих послідовностей та побудови діагностичних експериментів, запропоновані в цій роботі, засновані на концепціях керованості та спостерігальності, які широко використовуються для оцінок тістоприсадиності об'єкта діагностування (ОД).

У деяких структурах ІКМ відсутні верхні керовані входи, що знижує показники керованості мережі, а отже ускладнює процедуру тестового діагностування (ТД) справності мережі.

З метою покращення показників керованості та спостережуваності, спрощення процедур синтезу перевіряючих тестів та діагностування одновимірної ІКМ пропонується модифікувати структуру ІКМ та процедуру перевірки її справності відповідно до таких пропозицій та умов:

1) ввести до кожної комірки мережі **додаткові входи** x_i , $i = 1, 2, \dots, n$ для забезпечення умов керованості та транспортування несправностей у мережі на бічні виходи, що спостерігаються;

2) ввести до кожної комірки мережі **додаткові виходи** x_i , $i = 1, 2, \dots, n$ для забезпечення умов спостережуваності станів;

3) процедури перевірки справності елементів пам'яті та комбінаційної частини комірок мережі проводити окремо;

4) перевіряючий експеримент виконувати у 2 етапи відповідно до 2 напрямів поширення сигналів: ліворуч – праворуч та у зворотному напрямку, що дозволить виключити вплив зворотних зв'язків між комірками мережі та спростити процедури синтезу тестів та перевірки справності ІКМ.

При реалізації мережі на базі ПЛІС типу FPGA перелічені вище умови легко виконуються шляхом відповідного вибору типу ПЛІС та налаштування логічних блоків, що конфігуруються. Таким чином, завдання ТД ІКМ зводиться до завдання ТД одновимірної ІКМ (ОІКМ) або тільки з керованими входами в кожній комірці, або до перевірки справності ІКМ з керованими входами та спостережуваністю виходів у кожній комірці мережі.

Представлений метод синтезу перевіряючих послідовностей для ІКМ без спостережуваних виходів у кожній комірці мережі. На функціональному рівні опису комірки ОІКМ з бічними виходами, що спостерігаються, будемо розглядати його таблицю істинності як таблицю переходів-виходів (ТПВ) автомата Мура, що задається трійкою (X, Z, Q) . Така мережа є керованою, якщо в таблиці переходів комірки мережі множина станів наступників дорівнює повній множині станів. З умови керованості ІКМ випливає, що завжди існує перекладна послідовність $T(z_i, z_j)$, яка забезпечує появу на правому виході комірки $C(\alpha), \alpha = 1, p-1$, стану $z_j, j = 1, 2, \dots, n$.

Під спостережуваністю розумітимемо таку властивість ІКМ, яка забезпечує можливість ідентифікації в будь-якому внутрішньої комірки мережі кожного стану $z_i \in Z_\alpha$ та транспортування несправності типу $z_i \rightarrow Z/z_i$ на виходи мережі, що спостерігається. Необхідною умовою спостережуваності ІКМ є властивість мінімальності автоматної моделі комірки мережі, яка забезпечує помітність кожного стану комірки на виходах, що спостерігаються. Транспортування несправності на виходи мережі, що спостерігається, здійснюється додатком такого вхідного вектора X_T , який дозволяє відрізнити деякий стан $z_i, i = 1, 2, \dots, n$, комірки мережі, що перевіряється, від множини інших станів Z/z_i .

Наведемо метод синтезу перевіряючих послідовностей для ІКМ без виходів, що спостерігаються x'_i , заснований на аналізі автоматної моделі комірки мережі, побудові тестового графа (ТГ) пар станів за таблицею переходів автоматної моделі комірки та знаходження множини фундаментальних циклів у ТГ, що визначає, множина циклічних перевіряючих послідовностей усієї ІКМ. В основі побудови ТГ та його використання для знаходження безлічі перевіряючих тестів лежить поняття розрізнення пар станів, що входять до цього замкнутого циклу. Якщо у ТГ існує шлях із певної вершини $V_i = (z_a, z_b)$ до вершини V_j , що входить у деякий замкнутий цикл, то пара станів (z_a, z_b) є також помітною.

Метод синтезу перевіряючих тестів для ОІКМ, заснований на використанні ТГ комірку мережі, можна розглянути на прикладі одновимірної мережі без виходів, що спостерігаються, де мережа (рис. 1) складається з шести комірок із чотирма станами та однаковими правилами налаштування.

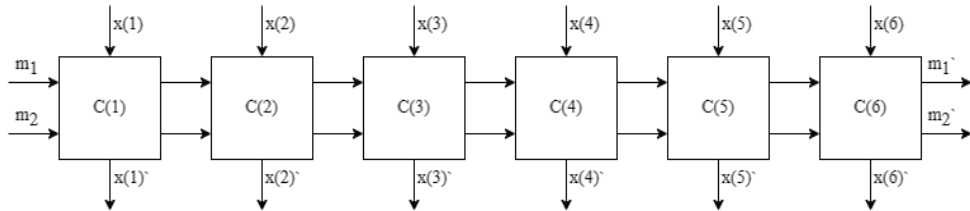


Рис. 1. Одновимірна ІКМ з виходами, що спостерігаються та додатковими виходами x_i

ТГ для аналізованої комірки мережі, побудований з його ТПВ і двох зв'язкових компонентів, у кожному з яких можна виділити множини фундаментальних циклів, тобто таких циклів, у яких є, щонайменше, одна дуга, що не належить ніякому іншому циклу. Якщо ТГ містить фундаментальний цикл, для виявлення всіх несправностей типу $(z_i \rightarrow z_j)$, $(z_j \rightarrow z_i)$, $(z_a \rightarrow z_b)$ і $(z_b \rightarrow z_a)$ у будь-якої комірки мережі достатньо докласти наступні чотири тести:

- 1) $z_i \xrightarrow{x_a} z_a \xrightarrow{x_b} z_i \xrightarrow{x_a} z_a \xrightarrow{x_b} \dots$,
- 2) $z_a \xrightarrow{x_b} z_i \xrightarrow{x_a} z_a \xrightarrow{x_b} z_i \xrightarrow{x_a} \dots$,
- 3) $z_j \xrightarrow{x_a} z_b \xrightarrow{x_b} z_j \xrightarrow{x_a} z_b \xrightarrow{x_b} \dots$,
- 4) $z_b \xrightarrow{x_b} z_j \xrightarrow{x_a} z_b \xrightarrow{x_b} z_j \xrightarrow{x_a} \dots$.

Незалежно від числа комірок мережі ці тести викликають появу різних станів в одній і тій ж комірці, а, отже, перелічені вище несправності виявляються на виході з мережі, що спостерігається. Оскільки множина переходів ТГ розглянутої вище мережі покривається множиною фундаментальних циклів, крім переходу $(z_0 z_1)^{x_0} z_1$, то для кожного циклу можна визначити множини тестів, що перевіряють правильність переходів та станів кожної комірки мережі. Для кожного фундаментального циклу G_1 - G_7 ТГ комірки мережі наведено тести, що дозволяють виявити несправну комірку мережі. Однак у ТГ є перехід $(z_0 z_1)^{x_0} z_1$, який не входить до жодного з розглянутих вище циклів і породжує невизначеність під час перевірки стану комірки мережі тестом $t_7 : z_1 \xrightarrow{x_0} z_1 \xrightarrow{x_0} z_1 \xrightarrow{x_0} z_1 \xrightarrow{x_0} z_1 \xrightarrow{x_0} z_1 \xrightarrow{x_0} z_1$.

Методика синтезу перевіряючих тестів заснована на використанні ТГ комірки мережі та виділенні множини фундаментальних циклів у ТГ, що має наступні особливості.

1. Складність процедури синтезу визначається складністю побудови ТГ та процедури знаходження фундаментальних циклів у графі.

2. Тести, побудовані за фундаментальними циклами ТГ комірки мережі, є, як правило, надлишковими.

3. Отримані тести можуть містити множину невизначених переходів, поява яких обумовлена наявністю в ТПВ комірки пар сумісних станів. Тому отримані тести необхідно аналізувати з метою знаходження таких невизначених переходів та подальшого розширення множини тестів, що перевіряють.

Складність процедури синтезу перевіряючих тестів за ТГ комірки ІКМ: n – кількість станів комірки мережі, g – ТГ, $g = Q(n^2)$. Якщо в графі t дуг, $(g - 1)$ які належать остову, то кількість всіх фундаментальних циклів дорівнює цикломатичному числу $U = t - g + b$, де b – число зв'язкових компонентів ТГ, $b \approx O(n)$. Так $z_k t \geq g \times g \approx (n^4)$, це верхня оцінка трудомісткості, в якій оцінці не враховується складність знаходження основного підграфа ТГ комірки мережі. Розглянуті вище недоліки існуючої методики синтезу перевіряючих тестів для ІКМ без виходів, що спостерігаються, можна виключити, якщо скористатися підходом, заснованим на використанні характеристичних послідовностей автоматної моделі комірки та побудові перевіряючих тестів на основі цих послідовностей, що буде предметом дослідження в наступних роботах.

Висновки. Запропоновано процедуру модифікації структури функціональних комірок мережі шляхом введення додаткового входу, що спрощує процедуру синтезу перевіряючих тестів для ОІКМ із бічними виходами, що спостерігаються, з метою покращення показників керованості ОІКМ у процесі діагностичного експерименту.

Розроблено процедуру побудови діагностичного експерименту для ІКМ із виходами, що спостерігаються, у якій автоматна модель ФМ мережі є сильнозв'язним автоматом і має відрізняючу послідовність. Показано, що така мережа є тестопридатною.

Список літератури:

1. Мірошник М. А. Проектування діагностичної інфраструктури обчислювальних систем і пристроїв на ПЛІС: монографія / М.А. Мірошник. – Харків.: ХУПС, 2012. – 188 с.
2. Мірошник М. А. Обробка подій у цифрових пристроях реального часу. / Мірошник М.А., Шкіль О.С., Рахліс Д.Ю., Пшеничний К.Ю., Мірошник А.Н. / Збірник наукових праць "Вісник ЧДТУ", 2023, №2, С. 50-57.

3. Мірошник М.А. Синтез часових автоматів з операційним перетворенням коду станів / Мірошник М.А., Зайченко О.Б., Мірошник А.М., Зайченко Н.С. // *Modern scientific researches*. №12, 2021, – С.65-79.
4. Miroshnyk, M.A. Design timed fsm with vhdl moore pattern / Miroshnyk, M.A.; Shkil, O.S.; Kulak, E.N.; Rakhlis, D.Y.; Miroshnyk, A.M.; Malahov, N.V. // *Journal Radio electronics computer science control*, ISSN 1607-3274 eISSN 2313-688X, 2020, Issue 2. – P. 137-148.
5. Hardware Implementation of Timed Logical Control FSM. Miroshnyk, M., Shkil, A., Rakhlis, D., ...Filippenko, I., Malakhov, M., 2020 IEEE East-West Design and Test Symposium, EWDTs 2020 - Proceedings, 2020. – 6 p.
6. Miroshnik M. A. Methods for designing self-checking digital machines. / M. A. Miroshnik, E. N. Kulak, E. M. Aliyeva, D. G. Karaman, Yu. V. Pakhomov // *Telecommunications and Radio Engineering*. – 2017. – Vol. 76, Issue 15, 2017. – P. 1367-1377.
7. Николайчук, Я. М. Структуризация, методы та моделі інтерактивної взаємодії оператор-інформаційна система моніторингу об'єктів нафтогазової галузі / Я.М. Николайчук, Н.Я. Возна, Г.Я. Процюк та ін. // *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ: всеукр. наук.-техн. журнал*. – Івано-Франківськ, 2015. – № 2 (55). – С. 111-118.
8. Николайчук, Я. М. Дослідження системних функцій та архітектури інтерактивних комп'ютерних мереж [Ел. ресурс] / Я.М. Николайчук, Р.В. Цанько, Н.Я. Возна // *Вісник Хмельницького національного університету*. – Хмельницький, 2012. – № 4 (191). – С. 73-78.
9. Кузьо М.М. Реконфігуровані обчислювальні системи на однорідній структурі Lviv Polytechnic National University Institutional Repository <http://ena.lp.edu.ua>, CSN., Number 688 2010; С.152-157.
10. Мірошник М. А. Однородные сети с распределенной системой реконфигураций / М.А. Мірошник, Я.Ю. Королева, Л.В. Дербунович // *Вісник НТУ „ХПІ”*. Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Автоматика та приладобудування. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2010. – № 20. – С. 71-78.

References:

1. Miroshnyk, M.A. (2012), *Designing the diagnostic infrastructure of computing systems and devices on FPGAs: a monograph*, Kharkiv., KHUPS, 188 p.
2. Miroshnyk, M.A., Shkil', O.S., Rakhlis, D.Yu., Pshenychnyy, K.Yu., Miroshnyk, A.N. (2023), Event processing in real-time digital devices. Collection of scientific works "ChDTU Bulletin, 2023, № 2, pp. 50-57.
3. Miroshnyk ,M.A., Zaychenko, O.B., Miroshnyk, A. M., Zaychenko, N.S. (2021), Synthesis of time automata with operational state code transformation, *Modern scientific researches*, № 12, 2021, pp. 65-79.
4. Miroshnyk, M.A., Shkil, A.S., Kulak, E.N., Rakhlis, D.Y., Miroshnyk, A.M., Malahov, N.V. (2020), Design timed FSM with VHDL Moore pattern [Design timed FSM with VHDL Moore pattern], *Radio Electronics, Computer Science, Control - Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2 (53), pp. 137-148.
5. Miroshnyk, M. A., Shkil, A. S., Kulak, E. N., Rakhlis, D. J., Filippenko, I.V. and Malakhov M. (2020), Hardware implementation of timed logical control FSM [Hardware implementation of timed logical control FSM]. Proc. of 2020 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTs'20), *Proc. of 2020 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTs'20)*, 6 p. [Electronic resource] / *IEEE Xplore Digital Library* – Access mode: www / URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9225129>.

6. Miroshnik, M.A. Kulak, E.N., Aliyeva, E.M., Karaman, D.G., Pakhomov, Yu.V. (2017), Methods for designing self-checking digital machines, *Telecommunications and Radio Engineering*, Vol. 76, Issue 15, pp. 1367-1377.
7. Nykolaychuk, Ya. M., Vozna, N.Ya., Protsyuk, H.YA. at all. (2015), Structuring, methods and models of interactive interaction between the operator and the information system for monitoring objects in the oil and gas industry, *Exploration and development of oil and gas deposits: throughout Ukraine. science and technology magazine*, Ivano-Frankivsk, № 2 (55), pp. 111-118.
8. Nykolaychuk, Ya.M., Tsan'ko, R.V., Vozna, N.Ya. (2012), Study of system functions and architecture of interactive computer networks [E-mail. resource], *Bulletin of the Khmelnytskyi National University*, Khmelnytskyi, № 4 (191), pp. 73-78.
9. Kuz'o, M.M. (2010), Reconfigurable computing systems on a homogeneous structure, *Lviv Polytechnic National University Institutional Repository*, <http://ena.lp.edu.ua>, CSN., Number 688 2010; S. 152-157.
10. Myroshnyk, M.A., Koroleva, Ya.Yu., Derbunovych, L.V. (2010), Homogeneous networks with a distributed system of reconfigurations, *Bulletin of NTU "KhPI". Collection of scientific works. Thematic issue: Automation and instrumentation*, Kharkiv, NTU "KHPI", № 20, pp. 71-78.

Статтю представив д-р техн. наук, проф., професор кафедри автоматизації проектування обчислювальної техніки Харківського Національного Університету Радіоелектроніки Кривуля Генадій Федорович

Надійшла 13.06.2023 р.

Miroshnyk Maryna, PhD Tech. Sc., professor.
V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv
Sq. Svobody, 4, Kharkov, Ukraine, 61166
Tel.: (099) 063-31-45, e-mail: m.miroshnyk@karazin.ua
ORCID ID: 0000-0002-2231-2529

Shkil Olexandr, PhD Tech, professor.
Kharkiv National University of Radioelectronics
Nauki, Ave.14, Kharkiv, Ukraine, 61166
Tel.: (067) 57-377-99, e-mail: oleksandr.shkil@nure.ua
ORCID ID: 0000-0003-1071-3445.

Rakhlis Dariia, PhD Tech, associate professor
Kharkiv National University of Radioelectronics
Nauki, Ave.14, Kharkiv, Ukraine, 61166
Tel.: (068) 920-22-60, e-mail: dariia.rakhlis@nure.ua
ORCID ID: 0000-0002-6652-1840.

Miroshnyk Anatolii, aspirant.
Kharkiv National University of Radioelectronics
Nauki, Ave.14, Kharkiv, Ukraine, 61166
Tel.: (095) 82-69-640, e-mail: anatolii.miroshnyk@nure.ua
ORCID ID: 0000-0001-5702-9611

Loboyhenko Dmytro, magistr.
Kharkiv National University of Radioelectronics
Nauki, Ave.14, Kharkiv, Ukraine, 61166
Tel.: (066) 139-20-67, e-mail: danylo.loboichenko@nure.ua
ORCID ID: 0000-0000-0000-0000

УДК 681.326

Методи побудови тестів для інтерактивних комп'ютерних мережах на структурно-логічному рівні / М.А. Мірошник, О.С. Шкіль, Д.Ю. Рахліс А.М. Мірошник, Д. А. Лобойченко // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2023. – № 1–2 (9–10). – С. 81 – 90.

Розроблено методи синтезу перевіряючих послідовностей інтерактивних комп'ютерних мереж з використанням циклічних, відмінних і характеристичних символів автоматної моделі комірки мережі. Розроблено та обґрунтовано новий метод модифікації автоматної діаграми комірки, яка не має відмінної послідовності і передбачає введення додаткового вхідного символу та використання кодів станів, що породжує Гамільтонів цикл у послідовності переходів. Розроблено методи та процедури синтезу одновимірних і двовимірних мережі з розподіленим управлінням конфігурацією. Іл.: 1. Бібліогр.: 10 назв.

Ключові слова: діагностичний експеримент; інтерактивна комп'ютерна мережа; одновимірна і двовимірна мережа; перевіряюча послідовність; комірка; додатковий вхідний символ.

UDC 681.326

Constructing tests methods for the interactive computer networks at the structural-logical level / M.A. Miroshnyk, O.S. Shkil, A.M. Miroshnyk, D.Yu. Rakhlis, D.A. Loboychenko // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2023. – № 1–2 (9–10). – P. 81 – 90.

Synthesizing test sequences methods for interactive computer networks using cyclic, distinguishing and characteristic symbols for the FSM model of a network cell have been developed. A new method for state diagram modification of a cell, which doesn't have a distinguishing sequence and provides for the input of an additional input symbol and usage of state codes, which generates a Hamilton cycle in the sequence of transitions has been developed and substantiated. Methods and procedures for the synthesis of one-dimensional and two-dimensional networks with distributed configuration control have been developed. Figs.: 1. Refs.: 10 titles.

Keywords: diagnostic experiment; interactive computer network; one-dimensional and two-dimensional networks; test sequence; cell; additional input symbol.