

УДК 004

К.В. САМУСЄВ, В.М. ЧЕШУН  
Хмельницький національний університет**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ СИСТЕМАТИЗАЦІЇ ДАНИХ  
ТЕСТОПРИДАТНОГО СИНТЕЗУ ЦИФРОВИХ ВУЗЛІВ**

*В статті запропоновано математичну модель, яка враховує основні особливості організації процесу діагностування сучасних цифрових пристроїв з елементами підвищеного ступеня інтеграції за умов можливості виникнення в їх структурі одиночних та кратних несправностей статичного або динамічного типу. Модель орієнтована на систематизацію даних і уточнення умов задач тестопридатного синтезу цифрових вузлів.*

*Ключові слова: математична модель, тестова діагностика, цифрові пристрої.*

K.V. SAMUSEV, V.M. CHESHUN  
Khmelnytsky National University**MATHEMATICAL MODEL FOR ORGANIZING DATA OF TESTABILITY DESIGN OF DIGITAL UNITS**

*In the article proposed a mathematical model which considers the the main features of the process of diagnosing modern digital devices with elements of high degree integration under conditions of possibility upon availability in their structure of single and multiple faults static or dynamic type. The model focuses on the systematization of data and clarify the conditions of task the testability synthesis of digital units.*

*Keywords: mathematical model, test diagnostics, digital device.*

**Вступ.** Забезпечення високих показників якості та надійності цифрових пристроїв і елементів обчислювальної техніки неможливе без застосування автоматизованих систем контролю та діагностування як на етапах їх виробництва, так і під час експлуатації [1]. Продуктивність та ефективність таких систем залежить не тільки від використовуваних спеціалізованих технічних засобів і реалізованих ними алгоритмів тестування, а і від особливостей об'єкта діагностування.

Складність структури сучасних цифрових пристроїв 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 [2]. І тим не менш, навіть за умов наявності необхідних коштів, далеко не завжди вдається розробити тестові послідовності для виявлення всіх можливих несправностей в структурі цифрового пристрою без її порушення.

Значного здешевлення процесу синтезу тестових послідовностей і діагностування загалом (як у вартості застосовуваних засобів тестового діагностування, так і через спрощення тестів) можна досягти, якщо умови для ефективного реалізації тестового діагностування цифрових пристроїв передбачати ще на етапі їх проектування. Відповідний напрям наукових досліджень утворився на межі теорії синтезу цифрових вузлів та технічної діагностики і був ідентифікований як синтез тестопридатних цифрових схем.

Задачам тестопридатного проектування приділяється значна увага з моменту постановки задачі тестового діагностування цифрових пристроїв і систем, але постійне вдосконалення і ускладнення структури останніх зумовлює актуальність досліджень в цьому напрямку і на сьогоднішній день.

**Постановка задачі.** Синтез цифрових пристроїв з підвищеною тестопридатністю передбачає їх адаптацію до процесу тестового або функціонального діагностування з метою підвищення його ефективності та достовірності як за рахунок забезпечення гарантованої можливості досягнення заданої глибини діагностування, так і за рахунок спрощення та здешевлення процедури синтезу тестів.

В задачах синтезу тестопридатних схем можна виділити декілька напрямків [3,4,5]:

- реалізація в схемі пристрою вбудованих засобів самодіагностування на функціональному рівні;
- реалізація в схемі пристрою вбудованих засобів розширеного тестового само діагностування;
- синтез тестопридатних схем, легкотестованих зовнішніми засобами.

Безумовною перевагою будь-якого методу тестопридатного синтезу цифрових вузлів є також спрямованість на забезпечення умов для неруйнівного контролю в процесі діагностування.

Зазначені переваги зумовлюють велику зацікавленість фахівців в галузі технічної діагностики питаннями синтезу тестопридатних цифрових вузлів.

В ході вирішення завдань тестопридатного синтезу цифрових вузлів доводиться розв'язувати цілий ряд проміжних задач. Оскільки розв'язок задач технічної діагностики передбачає застосування досить складного математичного апарату, їх часто безпосередньо асоціюють з задачами математичного моделювання.

Математичні моделі різного характеру використовуються на всіх етапах – від постановки умов задачі та систематизації вихідних даних і до безпосередньої реалізації процесу тестового діагностування та встановлення діагнозу. Ефективність процесу діагностування званою мірою залежить від адекватності та достовірності застосовуваних математичних моделей.

Однією із перших задач, яка постає при вирішенні завдань тестопридатного синтезу цифрових

вузлів, є розробка математичної моделі для систематизації використовуваних даних, що дозволить визначати вузькі місця в можливостях реалізації процесу діагностування та уточнювати умови для ефективного розв'язку кінцевої задачі синтезу.

**Основна частина.** Проаналізуємо умови, які повинні враховуватися при розробці математичної моделі для реалізації методу синтезу тестопридатних цифрових схем.

Слід зазначити, що на особливості реалізації процесу діагностування може впливати ряд характеристик технічних засобів, що, відповідно, впливає і на математичну модель. З метою усунення неоднозначності, при розробці математичної моделі будемо спиратися на такі положення:

- технічні характеристики застосовуваних засобів діагностування дозволяють здійснювати діагностування із максимальною глибиною, яка є допустимою з урахуванням структурних особливостей ОД;
- всі наявні блоки тест-векторів орієнтовані на застосовувані технічні засоби діагностування і процес їх подачі на контрольні точки ОД повністю реалізований за допомогою зазначених засобів;
- вимоги до послідовностей тест-векторів, відповідні характеристикам технічних засобів діагностування, виробляються на етапі розробки блоків тест-векторів і формулюються перед проведенням оптимізації за допомогою математичного апарату.

Структурні та функціональні особливості ОД є визначальними як на етапі розробки блоків тест-векторів, так і при розробці тестових послідовностей. Такими особливостями ОД в процесі тестового діагностування є:

- набір контрольних точок ОД для подачі послідовностей тест-векторів і прийому відповідних реакцій;
- класифікація можливих несправностей і станів ОД;
- статистичні ймовірності знаходження ОД в кожному з станів;
- склад розроблених блоків тест-векторів, перевіряюча здатність і вартість кожного з них.

Статистичні ймовірності знаходження ОД в кожному з станів можуть визначатися на підставі статистичних даних, накопичених при проведенні попередніх випробувань об'єкта або його аналогів. Якщо таких статистичних даних немає, то на першому етапі статистичні ймовірності знаходження ОД в розглянутих станах приймаються рівними, що дозволяє здійснити оптимізацію і, в процесі діагностування партії ОД, накопичити необхідні статистичні дані.

Вартість розроблених блоків тест-векторів може визначатися витратами часу, необхідного на їх подачу, кількістю утворюючих їх тест-векторів або іншими параметрами. Якщо в процесі діагностування немає необхідності скорочення витрат за критерієм вартості, то вартість блоків тест-векторів при побудові послідовностей тест-векторів може прийматися сталою для всіх елементів множини  $T$ .

Визначивши множину доступних контрольних точок ОД як  $M_{км}: \{K_1, K_2, \dots, K_i, \dots, K_p\}$ , де  $p = |M_{км}|$  - максимальна кількість доступних контрольних точок ОД, розіб'ємо її на три підкласи:

$M_{вх}: \{K_{вх 1}, K_{вх 2}, \dots, K_{вх i}, \dots, K_{вх r}\}$  - множина входів ОД  $M_{вх} \subseteq M_{км}$ ,  $|M_{вх}| = p$ ;

$M_{вих}: \{K_{вих 1}, K_{вих 2}, \dots, K_{вих i}, \dots, K_{вих s}\}$  - множина виходів ОД  $M_{вих} \subseteq M_{км}$ ,  $|M_{вих}| = s$ ;

$M_{вх-вих}: \{K_{вх-вих 1}, K_{вх-вих 2}, \dots, K_{вх-вих i}, \dots, K_{вх-вих p-r-s}\}$  - множина контрольних точок, які можуть використовуватися в процесі діагностування в якості входів або виходів ОД  $M_{вх-вих} \subseteq M_{км}$ ,  $|M_{вх-вих}| = p-r-s$ .

Нехай  $L: \{y_1, y_2, \dots, y_i, \dots, y_n\}$  - множина можливих станів ОД, де:  $y_i$  - стани ОД ( $i=1, 2, \dots, n$ ), що визначаються наявністю або відсутністю в його структурі дефектів;  $n$  - кількість зазначених станів,  $n = |L|$ .

За ознакою відсутності або наявності в ОД дефектів, множину  $L$  можна розбити на дві підмножини:

$L^N: \{y^N\}$  - множина справних станів ОД  $L^N \subseteq L$ ,  $|L^N| = 1$ ;

$L^B: \{y_1^B, y_2^B, \dots, y_i^B, \dots, y_n^B\}$  - множина несправних станів ОД,  $L^B \subseteq L$ ,  $|L^B| = n-1$ .

За класом несправностей множина  $L^B$  підрозділяється на підмножини:

$L^{BS}: \{y_1^{BS}, y_2^{BS}, \dots, y_i^{BS}, \dots, y_m^{BS}\}$  - множина несправних станів, можливість ідентифікації яких не залежить від частоти подачі послідовностей тест-векторів, тобто стани ОД, зумовлені наявністю тільки статичних несправностей  $L^{BS} \subseteq L^B$ ,  $|L^{BS}| = m$ ;

$L^{BD}: \{y_1^{BD}, y_2^{BD}, \dots, y_i^{BD}, \dots, y_{n-m-1}^{BD}\}$  - множина несправних станів, ідентифікація яких можлива тільки на частотах, близьких до максимальних робочих частот ОД, тобто стани, що визначаються наявністю динамічних несправностей  $L^{BD} \subseteq L^B$ ,  $|L^{BD}| = n-m-1$ .

Основною характеристикою будь-якого з розглянутих станів  $y_i \in L$  є статистична ймовірність  $P(y_i)$  знаходження ОД в зазначеному стані.

Позначимо множину блоків тест-векторів, розроблених для ідентифікації розглянутих станів ОД, як  $T: \{t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_k\}$ , де  $t_i$  -  $i$ -тий блок тест-векторів, що належить вказаній множині;  $k$  - кількість розроблених блоків тест-векторів,  $k = |T|$ .

Кожному блоку тест-векторів  $t_i \in T$  поставимо у відповідність множину утворюючих його тест-векторів  $T^i: \{t_1^i, t_2^i, \dots, t_j^i, \dots, t_b^i\}$ , де:  $t_j^i$  -  $j$ -тий тест-вектор, що входить до складу блоку тест-векторів  $t_i \in T$ ;  $b$  - кількість тест-векторів, що входять до складу блоку тест-векторів  $t_i \in T$ ,  $b = |T^i|$ .

Для елементів множини  $T$  ми можемо визначити такі характеристики:

- множину  $T^i$  тест-векторів, що складають кожний елемент  $t_i \in T$ , і їх розмірність  $b^i = |T^i|$ ;
- перевіряючу здатність блоку тест-векторів, що визначає можливість розділяти стани ОД  $y_l \in L$  і  $y_k \in L$  (при  $l \neq k$ );

- здатність сукупності блоків тест-векторів  $t_i \in T$  і  $t_j \in T$  розділяти стани ОД  $y_l \in L$  і  $y_k \in L$  (при  $l \neq k$ );
- вартість  $C(t_i)$  подачі блоку тест-векторів  $t_i \in T$  на ОД;
- ймовірність  $P(t_i)$  знаходження ОД в станах, які розділяються із справним при подачі блоку тест-векторів  $t_i \in T$ .

Дамо визначення здатності блоку тест-векторів розділяти стани ОД. Очевидно, що в результаті подачі блоку тест-векторів може бути отримана відповідна реакція, яка співпадає з еталонним значенням або ж не співпадає. Для зазначених випадків з вихідної множини можливих станів  $L$  може бути виділено підмножину станів, в яких може перебувати ОД при ідентичності одержуваного значення відповідної реакції еталонному, і підмножину станів, в яких може перебувати ОД при розбіжності зазначених значень. Позначимо їх відповідно  $L(t_i) \subseteq L$  і  $L'(t_i) \subseteq L$ . Таким чином, можна сказати, що блок-тест-векторів  $t_i \in T$  розділяє множину можливих станів  $L$  на підмножини  $L(t_i) \subseteq L$  і  $L'(t_i) \subseteq L$ , які є непересічними. Відповідно, можна говорити про те, що стани ОД  $y_l \in L$  і  $y_k \in L$  (при  $l \neq k$ ) розділяються в результаті подачі блоку тест-векторів  $t_i \in T$ , якщо  $y_l \in L(t_i)$  і  $y_k \in L'(t_i)$  або навпаки.

Визначення 1. Під здатністю блоку тест-векторів  $t_i \in T$  розділяти стани ОД будемо розуміти його здатність розділяти множину  $L$  на підмножини  $L(t_i) \subseteq L$  і  $L'(t_i) \subseteq L$  при виконанні умов  $y_l \in L(t_i)$  і  $y_k \in L'(t_i)$  або  $y_l \in L'(t_i)$  і  $y_k \in L(t_i)$ .

Аналогічним чином будемо визначати здатність розділяти стани ОД для сукупності блоків тест-векторів.

Визначення 2. Під здатністю сукупності блоків тест-векторів  $t_i, t_j$  (при  $t_i \in T$  і  $t_j \in T$ ) розділяти стани ОД будемо розуміти її здатність розділяти множину  $L$  на підмножини  $L(t_i) \subseteq L$  і  $L'(t_i) \subseteq L$  при виконанні умов  $y_l \in L(t_i)$  і  $y_k \in L'(t_i)$  або  $y_l \in L'(t_i)$  і  $y_k \in L(t_i)$ .

Для кожної множини  $T^i$  (при  $t_i \in T$ ) ми можемо визначити наступні характеристики.

-  $M_{ex}^{ij} \subseteq M_{ex} \cap M_{ex-vux}$  - множина контрольних точок, що використовуються при подачі тест-вектора  $t_{ji}$  як входи ОД для подачі тестових впливів.

-  $M_{vux}^{ij} \subseteq M_{vux} \cap M_{ex-vux}$  - множина контрольних точок, що використовуються при подачі тест-вектора  $t_{ji}$  як виходи ОД для зняття відповідних реакцій.

-  $M_{ex-vux}^{ij} \subseteq M_{ex-vux}$  - множина контрольних точок, що не використовуються при подачі тест-вектора  $t_{ji}$  і які можна використовувати за необхідності в якості входів або в якості виходів ОД.

Для однозначної ідентифікації стану ОД та моделювання процесу діагностування в пропонувану математичну модель введемо булеві змінні описаних нижче ознак і сформулюємо правила їх визначення.

$\alpha_m^{ij}$  - ознака визначеності рівня сигналу для контрольної точки  $k_m \in M_{km}$  в момент подачі тест-вектора  $t_j^i \in T^i$  (за умови  $t_i \in T$ ):

$$\begin{cases} \alpha_m^{ij} = 1, & \text{якщо значення рівня сигналу при подачі тест - вектора визначене;} \\ \alpha_m^{ij} = 0, & \text{якщо значення рівня сигналу може бути довільним.} \end{cases}$$

$\beta_m^{ij}$  - ознака рівня сигналу для контрольної точки  $k_m \in M_{km}$  в момент подачі тест-вектора  $t_j^i \in T^i$  (за умови  $t_i \in T$ ):

$$\begin{cases} \beta_m^{ij} = 1, & \text{якщо сигнал визначається високим рівнем;} \\ \beta_m^{ij} = 0, & \text{якщо сигнал визначається низьким рівнем або } \alpha_m^{ij} = 0. \end{cases}$$

$\gamma_m^{ij}$  - ознака визначеності характеру контрольної точки  $k_m \in M_{km}$  в момент подачі тест-вектора  $t_j^i \in T^i$  (за умови  $t_i \in T$ ):

$$\begin{cases} \gamma_m^{ij} = 1, & \text{якщо контрольна точка використовується як вхід або вихід ОД;} \\ \gamma_m^{ij} = 0, & \text{якщо контрольна точка може використовуватися як в якості входу, так і в якості виходу ОД.} \end{cases}$$

$\chi_m^{ij}$  - ознака напрямку передачі даних для контрольної точки  $k_m \in M_{km}$  в момент подачі тест-вектора  $t_j^i \in T^i$  (за умови  $t_i \in T$ ):

$$\begin{cases} \chi_m^{ij} = 1, & \text{якщо контрольна точка використовується як вхід ОД;} \\ \chi_m^{ij} = 0, & \text{якщо контрольна точка використовується як вихід ОД або } \gamma_m^{ij} = 0. \end{cases}$$

Перераховані ознаки дозволяють визначити стан і характер використання контрольних точок ОД  $k_m \in M_{km}$  при подачі кожного тест-вектора, що входить до складу послідовностей тест-векторів, що оптимізуються. Ці ознаки введені в модель для аналізу можливості проведення скорочення числа елементів множини  $T$  на підставі визначення характеру використання при їх подачі контрольних точок ОД.

Нижче сформульовані правила визначення значень булевих змінних ознак, що визначають перевіряючу здатність елементів множини  $T$ . Ці ознаки складають мінімальний набір ознак, необхідних для побудови та оптимізації послідовностей тест-векторів.

$\varphi_m^i$  - ознака здатності блоку тест-векторів  $t_i \in T$  розділяти стани ОД  $y_m \in L$  і  $y_n \in L$ :

$$\begin{cases} \varphi_m^i = 1, & \text{якщо блок тест - векторів має здатність розділяти стани } y_m \in L \text{ і } y_n \in L; \\ \varphi_m^i = 0, & \text{якщо блок тест - векторів не має здатності розділяти стани } y_m \in L \text{ і } y_n \in L. \end{cases}$$

$\psi_m^i$  - ознака здатності сукупності блоків тест-векторів  $t_i \in T$  і  $t_j \in T$  розділяти стани ОД  $y_m \in L$  і  $y_n \in L$  :

$$\begin{cases} \psi_m^i = 1, & \text{якщо сукупність блоків тест - векторів має здатність розділяти стани } y_m \in L \text{ і } y_n \in L; \\ \psi_m^i = 0, & \text{якщо сукупність блоків тест - векторів не має здатності розділяти стани } y_m \in L \text{ і } y_n \in L. \end{cases}$$

Визначення 3. Під послідовністю тест-векторів будемо розуміти сукупність тест-векторів  $t \in Q$  і послідовності, в якій вони подаються на ОД для ідентифікації станів у  $\mathcal{E}$ .

Вартість тестування ОД визначається сумарною вартістю подачі блоків тест-векторів, що складають послідовність тест-векторів, призначену для реалізації процесу діагностування.

**Висновки.** Пропонована математична модель розроблена з урахуванням особливостей реалізації процесу тестового діагностування сучасних цифрових пристроїв і призначена для систематизації використовуваних даних при вирішенні завдань тестопридатного синтезу цифрових вузлів, що дозволить визначати вузькі місця в можливостях реалізації процесу діагностування та уточнювати умови для ефективного розв'язку кінцевої задачі синтезу. Зокрема, з використанням пропонованої математичної моделі можна оцінювати відповідність можливостей наявних тестів щодо вимог забезпечення заданої глибини діагностування, визначати стани об'єкта діагностування, що не можуть бути ідентифіковані та виявляти інші невідповідності наявних умов поставленим вимогам для уточнення задачі тестопридатного синтезу цифрових вузлів.

### Література

1. Буков В.Н. Три подхода к задаче контроля технического состояния / Буков В.Н., И.М. Максименко // Автоматика и телемеханика.- 1995.- №3.- С. 165-178.
2. Гремальский А.А. Генерация многосвязных тест-программ для псевдослучайного контроля микропроцессоров / А.А. Гремальский, А.А. Рощка, В.Е. Бежин // Электронное моделирование.- 1991.- №3.- С.63-67.
3. Матросова А.Ю. К синтезу самопроверяемых комбинационных схем / А.Ю. Матросова, С.А. Останин // Международная конференция «Всесибирские чтения по математике и механике», Россия, Томск, Тезисы докладов том 1 «Математика»,-1997.-160-161 с.
4. Матросова А.Ю. Синтез легкодиагностируемых автоматов / А.Ю.Матросова, В.Д. Байда, В.В. Сафронов // Методы и системы технической диагностики. Вып. 1. Изд-во Саратовского университета. -1980. - С. 17-26.
5. Матросова А.Ю. К синтезу контролепригодных комбинационных устройств / А.Ю. Матросова, С.А. Останин, Н.А. Паршина // Автоматика и телемеханика. -№2. -1999. - С. 129-137.

### References

1. V.N. Bukov Three approaches to the problem of control of technical condition / V.N. Bukov, I.M. Maksimenko // Automation and telemechanics .- 1995.- №3.- P. 165-178.
2. Gremalschi A.A. Generation of multiply test programs for the pseudo-random control microprocessors / A.A. Gremalschi, A.A. Rosca, VE Bezhin // Electronic simulation .- 1991.- №3.-P.63-67.
3. Matrosova A.Yu. The synthesis of self-checking combinational circuits / A.Yu. Matrosova, S.A. Ostanin // International Conference "All-Siberian Readings on Mathematics and Mechanics", Russia, Tomsk, Abstracts Volume 1 "Mathematics" - 1997-160-161 p.
4. Matrosova A.Yu. Synthesis legkodiagnostiruemyh machines / A.Yu.Matrosova, V.D. Baida, V.V. Safronov // Methods and systems of technical diagnostics. Vol. 1. Publishing House of the University of Saratov. -1980. - P. 17-26.
5. Matrosova A.Yu. The synthesis of combinational testability devices / A.Yu. Matrossov, S.A. Ostanin, H.A. Parshin // Automation and telemechanics. -№2. -1999. - S. 129-137.

Рецензія/Peer review : 17.12.2014 р.

Надрукована/Printed :2.1.2015 р.