

УДК 004.052.32

**Ю.Е. Зинченко** (канд. тех. наук, доц.),  
**А.А. Корченко** (аспірант), **Т.А. Зинченко** (асистент)  
Донецкий национальный технический университет  
zinchenko@donntu.edu.ua

## **МАШИННО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ СПОСОБ РАСЧЕТА СЛУЧАЙНОГО ТЕСТА КОНСТАНТНЫХ НЕИСПРАВНОСТЕЙ ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ**

Предлагается способ определения зависимости длины случайного теста от вероятности обнаружения константных неисправностей (КН) цифровых устройств (ЦУ) по концепции «наихудшей неисправности», основанный на сочетании аналитического алгоритма определения списка труднотестируемых КН и машинного моделирования для определения наилучшей КН из труднотестируемых. В качестве исходной информации выступает логическая схема комбинационной части ЦУ и вероятности следования сигналов случайного теста.

**Ключевые слова:** случайное тестирование, константная неисправность, вероятность сигнала, длина последовательности.

### **Введение**

Построение зависимости  $N(Q)$  длины случайного теста  $N$  от вероятности обнаружения неисправностей  $Q$  некоторого объекта диагностики (ОД) строится по формуле (1) [1]:

$$N = \frac{\log(1-Q)}{\log(1-q)}, \quad (1)$$

либо

$$Q = 1 - [1 - q]^N \quad (2)$$

где  $q$  – параметр, выбранный в качестве критерия тестируемости ОД, лежащий в диапазоне от нуля до единицы.

При этом задаваясь конкретными значениями вероятности  $\{Q_i\}$  по формуле (1) можно рассчитать значения длины теста  $\{N(Q_i)\}$  и, наоборот, задаваясь конкретными значениями длины случайного теста  $\{N_i\}$  по формуле (2) можно получить значения вероятностей теста  $\{Q(N_i)\}$ . На основе табличных данных путем их аппроксимации строится графическая зависимость  $N(Q)$ , имеющая следующий качественный вид (рис. 1):

Пользуясь такой зависимостью на практике для некоторого ОД в зависимости от конкретных условий можно находить либо длину случайного теста, покрывающего КН объекта с заданной вероятностью –  $N(Q_{зад})$  либо, наоборот, вероятность обнаружения неисправностей ОД, которую обеспечивает тест заданной длины –  $Q(N_{зад})$ .

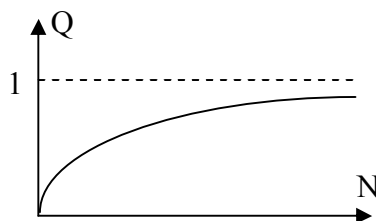


Рисунок 1 – Залежність довжини випадкового тесту від ймовірності виявлення несправностей ОД в загальному вигляді

Основна проблема при побудові такої залежності полягає в визначенні параметра  $q$ . К нинішньому часу в якості  $q$  використовують один з наступних параметрів:

- $q_{kom}$  – ймовірність появи «найгіршої входної комбінації ОД»;
- $q_{cp}$  – ймовірність тестуємості «середнестатистическої несправності» ОД;
- $q_t$  – ймовірність тестуємості «найгіршої» (труднотестуємої) несправності ОД.

Найпростіше визначається перший параметр, однак його використання в якості параметра  $q$  призводить до надмірної довжини випадкового тесту. Другий параметр найбільш точно міг би відображати довжину побудованого на його основі тесту, однак сьогодні ніхто ще не запропонував практичну методику його визначення. На практиці найбільшу популярність отримав третій параметр, який в цій роботі також приймається в якості базового для обґрунтування запропонованого підходу визначення залежності  $N(Q)$  для ОД в цілому.

В даний час для визначення для пошуку найгіршої несправності ОД і визначення її ймовірності тестуємості використовується метод STAFAN (*STAtistical Fault ANalysis*), який зводиться до спільного моделювання на виснажливому, випадковому або псевдовипадковому тесті ОД і заздалегідь побудованих для кожної КН логічних схем тестуємості несправності [2,3]. По результатах моделювання визначається КН  $h_k$ , на виході схеми тестуємості якої генерується найменше число  $E(h_k)$  логічних «1». Така несправність вважається найгіршою, а параметр  $q_t$  визначається як відношення  $E(h_k)$  до довжини тестових векторів  $|T|$ . Так як в реальних ОД число КН може исчислятися сотнями тисяч і навіть мільйонами, то основним недоліком методу STAFAN є надзвичайно велика трудомісткість і низька швидкість процесу моделювання.

### **Методика побудови залежності $N(Q)$**

Ідея запропонованого в цій роботі методу, спрямованого на подолання вказаного недоліку, полягає в тому, що процесу

моделирования схем тестируемости подвергаются не всех КН ОД, а предварительно проминимизированного их подмножества, что делается за счет анализа вероятностей сигналов во всех контрольных точках ОД.

В качестве исходной информации выступают:

- логическая (вентильная) схема ОД;
- $\{p_1, p_2, \dots, p_n\}$  – вероятности следования сигналов лог. «1» на входах  $x_1, x_2, \dots, x_n$  ОД

Предлагаемый машинно-аналитический метод состоит из следующих этапов.

- I. Определение вероятностей  $\{P_{y_1}, P_{y_2}, \dots, P_{y_g}\}$  следования сигналов лог. «1» на выходах логических элементов (ЛЭ) ОД машинно-аналитическим способом.
- II. Поиск «труднотестируемых» КН ОД по алгоритму «dQ» и построение минимального списка неисправностей  $H_{min} = \{h_k\}$ , подозреваемых на наихудшую.
- III. Определение вероятностей тестируемости для каждой неисправности  $h_k \in H_{min}$  машинным способом по методу STAFAN.
- IV. Выбор наихудшей КН из труднотестируемых и определение  $q_t$  как минимальной вероятности тестируемости одной из труднотестируемых КН:

$$q_t = q_{min} = \min \{ q(h_k) \}. \quad (3)$$

- V. Построение зависимости  $N(Q)$  по формуле:

$$N = \frac{\log_a(1-Q)}{\log_a(1-q_t)}, \quad (4)$$

где  $\log_a$  - логарифм по произвольному основанию  $a$ .

Опишем этапы предлагаемого метода.

На первом этапе на основе заданных вероятностей следования входных сигналов ОД определяются вероятности следования сигналов на выходах логических элементов –  $\{P_{y_j}\}: \{P_{x_i}\} \rightarrow \{P_{y_j}\}$ .

Такие вероятности можно рассчитать аналитически, применяя один из известных алгоритмов [4,5], однако сходящиеся разветвления цепей ОД усложняют этот расчет. Для упрощения этой задачи предлагается сочетать аналитический и машинный подходы следующим образом:

- находятся все ЛЭ ОД, на входах которых имеется хотя бы одно сходящееся разветвление;
- путем машинного моделирования ОД на исчерпывающем, случайном (псевдослучайном) тесте определяются частоты следования сигналов

на выходах указанных ЛЭ, которые принимаются как приближенные значения вероятностей сигналов на выходах этих ЛЭ;

- для остальных ЛЭ вероятности сигналов на их выходах рассчитываются аналитически по известным формулам вероятностей для логических функций [4,5] по исходным значениям входных вероятностей и полученным вероятностям на выходах ЛЭ со сходящимися разветвлениями.

После выполнения первого этапа известны вероятности следования сигналов во всех КТ ОД. На основе этой информации выполняется второй этап – определение списка труднотестируемых КН. Для этого предлагается аналитический, так называемый, алгоритм «dQ».

### **Алгоритм «dQ» - определение труднотестируемых КН**

Идея алгоритма состоит в том, что относительно КТ ЛЭ производится сравнительный анализ КН с точки зрения вероятностей их тестируемости, путем анализа не абсолютных значений, а попарно взятых разниц вероятностей, получаемых косвенным путем в зависимости от логических функций ЛЭ и с учетом разветвленности цепей ОД. Выбирается КН, имеющая наименьшее значение.

Алгоритм состоит из следующих этапов.

#### 1. Ранжирование ЛЭ схемы.

Входам схемы присваивается нулевой ранг. ЛЭ  $V_j$  присваивается ранг  $r$ , если максимальный ранг ЛЭ, подключенных ко входу элемента  $V_j$ , составляет  $r-1$ .

#### 2. Инициализация.

$H_{min} = \emptyset$ ,  $r=1$ , все ЛЭ объявляются «непомеченными».

#### 3. Определение труднотестируемых КН, расположенной на КТ всех ЛЭ типа И, И-НЕ ранга $r$ .

Для каждого ЛЭ типа И, И-НЕ ранга  $r$ , кроме инвертора, находится вход  $X_{max}$  с максимальной вероятностью сигнала  $P_{max}$ .

Если  $P_{max} > 0.5$  и вход  $X_{max}$  принадлежит многополюсной линии связи (ЛСн), либо вход подключен к непомеченному ЛЭ, то неисправность  $X_{max} \equiv 1$  заносится в список  $H_{min}$ .

#### 4. Определение труднотестируемых КН, расположенной на КТ всех ЛЭ типа ИЛИ, ИЛИ-НЕ ранга $r$ .

Для каждого ЛЭ типа ИЛИ, ИЛИ-НЕ ранга  $r$ , кроме инвертора, среди всех входов, принадлежащих двухполюсным линиям связи (ЛС2) находится вход  $X_{min}$  с минимальной вероятностью сигнала  $P_{min}$ . Если  $P_{min} < 0.5$  и вход  $X_{min}$ , если таковой будет найден, подключен к непомеченному ЛЭ, то в  $H_{min}$  заносится неисправность  $X_{min} \equiv 0$ .

#### 5. Инкремент ранга.

Если  $r < max$ , то  $r=r+1$  и производится переход на п.3 алгоритма.

### 6. Удаление «связывающих» неисправностей.

Из списка  $H_{min}$ , полученном после выполнения пп 1-5 алгоритма, удаляются все «связывающие» КН, вероятность управляемости которых выше вероятности управляемости соответствующих им «связанных» неисправностей. (КН  $h1$  и  $h2$  называются «связанными»  $h1*h2$ , если существует одномерный схемный путь, одновременно проходящий через обе неисправности. Если путь проходит в направлении от  $h1$  к  $h2$ , то  $h1$  называется «связывающей», а  $h2$  – «связанной»).

### 7. Конец.

После того, как построен список труднотестируемых КН  $H_{min}$ , выполняется следующий этап – определение худшей КН и ее вероятности тестируемости. Для этого для каждой неисправности  $h_k \in H_{min}$  строится схема тестируемости машинным способом по методу STAFAN, после чего выполняется совместное моделирование этих схем с ОД. Выход каждой схемы заводится на двоичный счетчик.

### Пример построения зависимости $N(Q)$

В качестве примера построим зависимость  $N(Q)$  для комбинационной логической схемы (КЛС), приведенной на рис. 2.

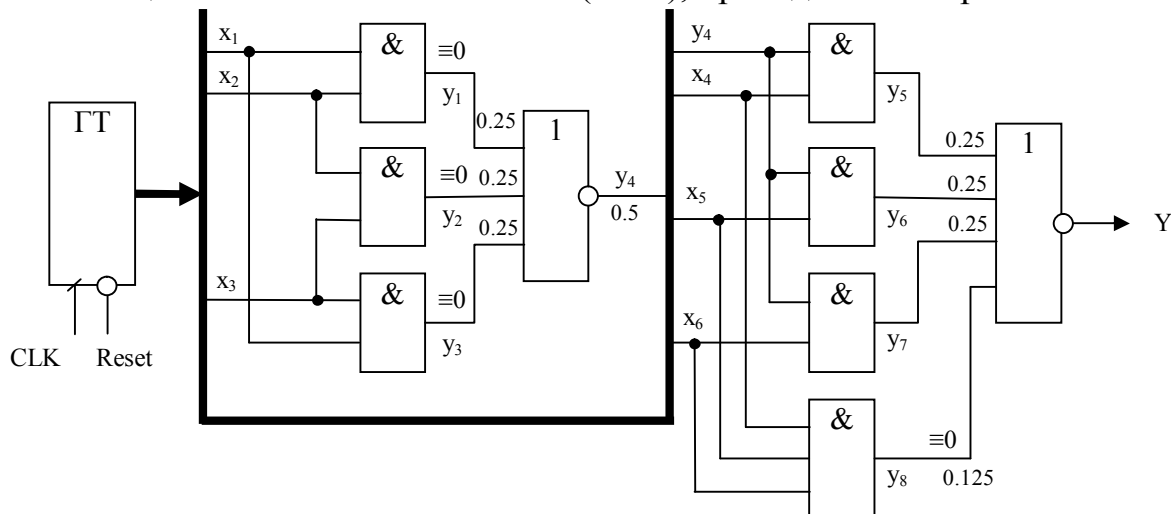


Рисунок 2 – Пример КЛС для расчета зависимости  $N(Q)$

Пусть на входах КЛС генерируется случайный (псевдослучайный) тест с равновероятными сигналами лог. «0» и «1», т.е.  $P_{xi}=0,5$  для всех  $i=(1,2, \dots, 6)$ .

В соответствии с приведенной методикой на первом этапе определяем внутренние ЛЭ со сходящимися разветвлениями, получаем единственный элемент с выходом  $y_4$ . Путем моделирования на исчерпывающем тесте определяем число единиц на этом выходе и,

соотнося его с длиной теста, получаем вероятность следования лог. «1» на этом выходе –  $P_{y4} = 0,5$ .

Далее аналитически определяем вероятности во всех других внутренних КТ, которые наносим на линии КЛС.

Применяя алгоритм "dQ" определяем список труднотестируемых КН, который также наносим на схему.

Для определения "наихудшей" из труднотестируемых КН строим схемы тестируемости для каждой из них в соответствии с методом STAFAN [2,3], которые показаны на рис.3.

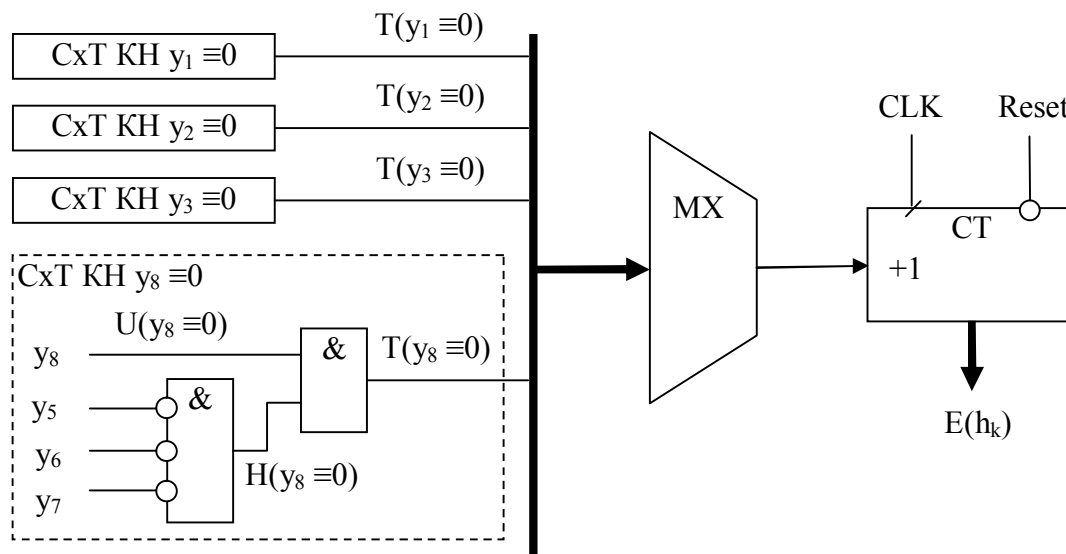


Рисунок 3 – Схемы тестируемости КН

В качестве примера одна из таких схем (для КН  $y_8=0$ ) показана подробно, где  $U(y_8=0)$  и  $H(y_8)$  символизируют функции управляемости и наблюдаемости КН соответственно [4]. Выполняя моделирование построенных СхТ на псевдослучайном тесте совместно с КЛС определяем  $E(hk)$  – число лог. «1», которое появляется на выходе каждой из этих схем. Выбираем неисправность  $y_8=0$ , для которой получается минимальное число, которую объявляем «наихудшей». Далее определяем вероятность тестируемости этой КН и соответственно параметр КЛС в целом как отношение  $E(y_8=0)$  к длине теста – получаем  $q_t = q(y_8=0) = 0,0625$ . На заключительном этапе по формуле (4) строим искомую зависимость  $N(Q)$  для КЛС, показанную на рис. 4.

### Заключение

В настоящее время предложенный метод внедряется в систему адаптивного псевдослучайного тестирования цифровых устройств «АГАТ» [7-9], разрабатываемую в лаборатории ДонНТУ «FPGA-технологии

проектирования и диагностика КС», что позволит использовать его в составе системы для оценки длины теста в ходе диагностики реальных объектов радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры.

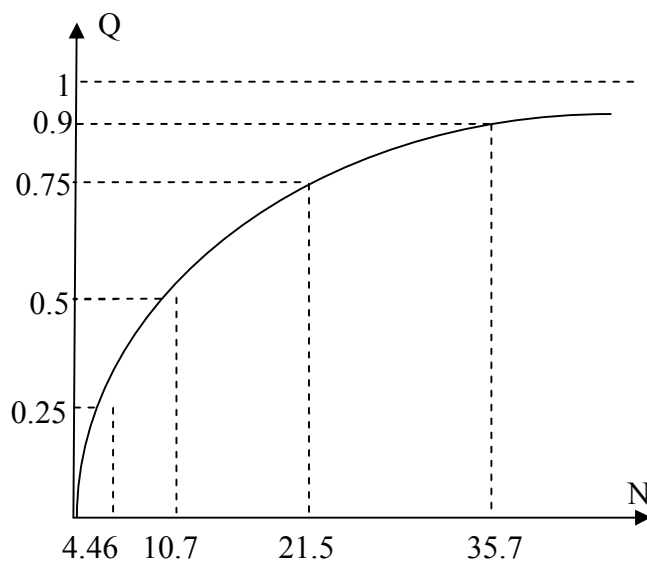


Рисунок 4 – Зависимость  $N(Q)$  для КЛС

### Список литературы

1. Rene David. Random testing of digital circuits. – CRC Press, 1998. – 496 p.
2. Jain S.K., Agrawal V.D Statistical fault analysis // IEEE Des. Test. Vol.2, N1, February 1985. – P.38-44.
3. Jain S.K., Agrawal V.D STAFAN: an alternative to fault simulation / Proc. 21-st D.A. Conf.-1984. – P.18-23.
4. Яролик В.Н. Контроль и диагностика цифровых узлов ЭВМ. Минск: Наука и техника, 1988. – 240 с.
5. Яролик В.Н., Демиденко С.Н. Генерирование и применение псевдослучайных сигналов в системах испытаний и контроля.– Мн.: Наука и техника, 1986. – 200с.
6. Bushnell M.L., Agrawal V.D Essentials of electronic testing for digital, memory and mixed-signal VLSI circuits. – Kluwer academic publishers, 2001. – 690 p.
7. Корченко А.А., Зинченко Ю.Е. Оптимизация адаптивного подхода генерации псевдослучайных тестов // Наукові праці ДонНТУ. Серія «Проблеми моделювання та автоматизації проектування» (МАП-2012). Вип. 10. – Донецьк: ДонНТУ. – 2012. – с. 60-68.
8. Зинченко Ю.Е., Корченко А.А. Адаптивный подход к генерации псевдослучайных тестов цифровых устройств // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Проблеми моделювання та автоматизації проектування» (МАП-2011). Випуск 9 (179): – Донецьк: ДонНТУ. – 2011. – С. 360-365.
9. Зинченко Ю., Калашников В., Хайдук С. и др. FPGA-технологии проектирования и диагностика компьютерных систем / Сборник научных трудов VI Междунар. научн.-практ. конф. «Современные информационные технологии и ИТ-образование». – Москва: МГУ, 2011. – Т. 1. 787 С. 422-429, – электрон. опт. диск (CD

*Надійшла до редакції 03.09.2012 р.*

*Рецензент: канд.техн.наук, доц. Дяченко О.Н.*

**Ю.Є. Зинченко, О.О. Корченко, Т.О. Зинченко**

Донецький національний технічний університет

**Машинно-аналітичний спосіб розрахунку випадкового тесту константних несправностей цифрових пристроїв.** Пропонується спосіб визначення залежності довжини випадкового тесту від ймовірності виявлення константних несправностей (КН) цифрових пристроїв (ЦУ) по концепції «найгіршої несправності», заснований на поєднанні аналітичного алгоритму визначення списку важкотестуємих КН і машинного моделювання для визначення найгіршої КН з важкотестуємих. В якості вихідної інформації виступає логічна схема комбінаційної частини ЦУ і ймовірності проходження сигналів випадкового тесту.

**Ключові слова:** випадкове тестування, константна несправність, ймовірність сигналу, довжина послідовності.

**Y.E. Zinchenko, A.A. Korchenko, T.A. Zinchenko**

Donetsk National Technical University

**Machine-analytical method for calculating the random test of stuck-at faults of digital devices.** The paper provides a method of defining the dependence of the length of a random test on the probability of detecting stuck-at faults of digital device according to the concept of “worst failure”, based on a combination of analytical methods. As the initial information the logic combination of digital device and the signals probabilities of a random test is considered.

**Keywords:** random testing, stuck-at faults, the probability of a signal, sequence length.