

ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ СИНТЕЗА СХЕМ ВСТРОЕННОГО КОНТРОЛЯ НА ОСНОВЕ ЛОГИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИИ СИГНАЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ РАВНОМЕРНЫХ РАЗДЕЛИМЫХ КОДОВ

© 2024 г. Д. В. Ефанов^{1,2,3,4,*}, Е. И. Елина^{1,**}

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

² Российский университет транспорта, Москва, Россия

³ Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Узбекистан

⁴ ООО «НИПИ «ТрансСтройбезопасность», Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: TrES-4b@yandex.ru

**E-mail: eseniya-elina@mail.ru

Поступила в редакцию 16 апреля 2024 г.

После доработки 10 июня 2024 г.

Принята к публикации 10 июня 2024 г.

Исследуются особенности синтеза схем встроенного контроля на основе логической коррекции сигналов с применением равномерных разделимых кодов. Рассматриваются структуры трех типов: тип I – структура с коррекцией части сигналов с выходов объекта диагностирования, формирующих проверочные символы заданного кода в схеме встроенного контроля; тип II – структура с коррекцией части сигналов с выходов объекта диагностирования, формирующих информационные символы заданного кода в схеме встроенного контроля; тип III – структура с коррекцией сигналов от всех выходов объекта диагностирования. Для структур всех типов приведены формулы определения числа способов синтеза схем встроенного контроля на основе логической коррекции сигналов с применением заданного кода. Установлены новые свойства структур, характеризующие особенности роста числа способов синтеза схем встроенного контроля при увеличении числа выходов, формирующих информационные и проверочные символы. Найдены закономерности, позволяющие на практике оценивать число способов синтеза схем встроенного контроля на основе логической коррекции сигналов с применением равномерных разделимых кодов в целях выбора наилучшего из них по заданным критериям. Приведены примеры, демонстрирующие эффективность использования найденных закономерностей.

Ключевые слова: самопроверяемые цифровые устройства, логическая коррекция сигналов, равномерные разделимые коды в задачах обнаружения неисправностей, синтез схем встроенного контроля

DOI: 10.31857/S0544126924050079

1. ВВЕДЕНИЕ

Использование схем встроенного контроля (СВК) позволяет обнаруживать неисправности и ошибки в вычислениях устройствами автоматики и вычислительной техники в процессе реализации ими своих функций [1, 2]. Такое свойство крайне важно для обеспечения надежности и безопасности устройств, функционирующих в системах различного назначения, в том числе, являющихся составляющими систем управления ответственными технологическими процессами в промышленности и на транспорте [3, 4].

При синтезе СВК используются принципы дробного и кратного резервирования, а также диверсной защиты. Существуют методы, основан-

ные на использовании внутренней избыточности – внесения ее в структуру исходного устройства (объект диагностирования), а также основанные на внесении внешней избыточности – применении внешних средств технического диагностирования. Здесь широко используются методы теории информации и кодирования в процессе выбора способа внесения избыточности [5–10].

Известен [11, 12] традиционный подход к организации СВК с внешними средствами технического диагностирования, основанный на отождествлении булевого вектора, формируемого на выходах объекта диагностирования, с информационным вектором и дополнении его во внешней СВК с применением контрольных устройств до кодового слова заранее выбранного двоичного рав-

номерного кода. В процессе вычисления функций объектом диагностирования во время эксплуатации могут возникать неисправности, приводящие к ошибкам на его выходах, что, в свою очередь, приводит и к возникновению искажений символов кодовых слов и фиксируется тестером заданного кода. Часто в традиционной структуре организации СВК применяют свойства двоичных разделимых кодов: информационный вектор формируется на выходах объекта диагностирования, а контрольный — на выходах устройства контрольной логики. При этом физически объект диагностирования и устройство контрольной логики разделены, что позволяет понятным образом обеспечивать самопроверяемость структуры конечной системы [13].

Достоинства традиционного подхода к организации СВК очевидны, а вот недостатком является то, что при использовании заданного равномерно-го кода число вариантов синтеза СВК для устройства с конкретными параметрами является крайне малым. Это не позволяет в ряде случаев добиваться обеспечения свойства его самопроверяемости. Однако существует альтернативный подход, основанный на логической коррекции сигналов (ЛКС) в СВК, лишенный данного недостатка [14].

Использование ЛКС при организации СВК с применением равномерных кодов дает возможность синтеза большого числа самопроверяемых устройств. Более того, в практических приложениях удастся синтезировать полностью самопроверяемые структуры даже в тех случаях, когда этого невозможно добиться при использовании традиционных подходов к синтезу СВК, основанных на применении традиционного подхода [15].

Использованию ЛКС совместно с равномерными кодами посвящено большое количество работ (однако в сотни раз меньше, чем использованию традиционного подхода). Например, в [16–18] обсуждаются особенности применения неразделимых равномерных кодов при синтезе СВК на основе ЛКС, в [19–21] — разделимых равномерных кодов с учетом их свойств, в [22, 23] — использования свойств особых классов булевых функций совместно с ЛКС, а в [24, 25] — применения сразу же двух диагностических признаков для организации контроля вычислений на основе ЛКС. В данной статье авторы приводят результаты исследований общего числа способов синтеза СВК на основе ЛКС с применением равномерных разделимых кодов.

ИСХОДНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ И ДОПУЩЕНИЯ

При синтезе схем встроенного контроля (СВК) на основе логической коррекции сигналов (ЛКС) с применением разделимых равномерных кодов, или (m, k) -кодов, где m и k — число информационных и проверочных символов, могут рассматриваться три основные структуры. Структура типа I

подразумевает использование ЛКС для преобразования части функций, вычисляемых на выходах объекта диагностирования, в функции, описывающие проверочные символы заданного (m, k) -кода. Следует отметить, что такое преобразование оказывается единственным для заданной последовательности преобразуемых выходов объекта диагностирования в силу того, что каждому информационному вектору будет соответствовать единственный контрольный вектор (m, k) -кода. Структура типа II основана на логической коррекции сигналов только с тех выходов объекта диагностирования, которые участвуют в формировании информационных символов (m, k) -кода. Здесь преобразование не является единственным, так как для (m, k) -кода при условии $m > k$ одному контрольному вектору может соответствовать два и более информационных векторов. Структура типа III — обобщенная структура организации СВК — основана на использовании ЛКС сразу же со всех выходов объекта диагностирования. В такой структуре возможно гораздо большее количество вариантов доопределения значений информационных и проверочных символов заданного (m, k) -кода. Эти структуры не являются новыми. Структура типа I исследовалась в работах [19, 20, 26], структура типа II рассматривалась в [27] и структура типа III — в [28, 29].

На рис. 1 приведены каскады элементов преобразования для структур всех трех типов. Во всех структурах объектом диагностирования является блок $F(x)$, формирующий систему булевых функций $f_1, f_2, \dots, f_n$, $n = m + k$. Данные функции участвуют в формировании кодовых слов выбранного на этапе проектирования СВК (m, k) -кода, описываемых функциями $h_1, h_2, \dots, h_n$. В структурах типа I и II часть из рабочих функций объекта диагностирования корректируются, а часть — нет; в структуре типа III корректируются значения всех булевых функций. Функции логической коррекции сигналов вычисляются блоком контрольной логики $G(x)$.

Ясно, что могут рассматриваться и другие вариации структур организации СВК на основе ЛКС с применением (m, k) -кодов. Однако в дальнейшем изложении ограничимся только тремя основными.

Работа устройств $F(x)$ происходит при подаче на t входов множества булевых векторов длиной t . Рассмотрим общий случай, когда объект диагностирования функционирует при подаче полного множества входных комбинаций. Его мощность равна 2^t . При рассмотрении (m, k) -кода будем рассматривать полное множество его кодовых слов. Его мощность будет равна 2^m . Максимальное число контрольных векторов будет равно 2^k . Причем, будем рассматривать только те (m, k) -коды, для которых при формировании всех 2^m информационных векторов, контрольные векторы генерируются равномерно. Другими словами, ка-

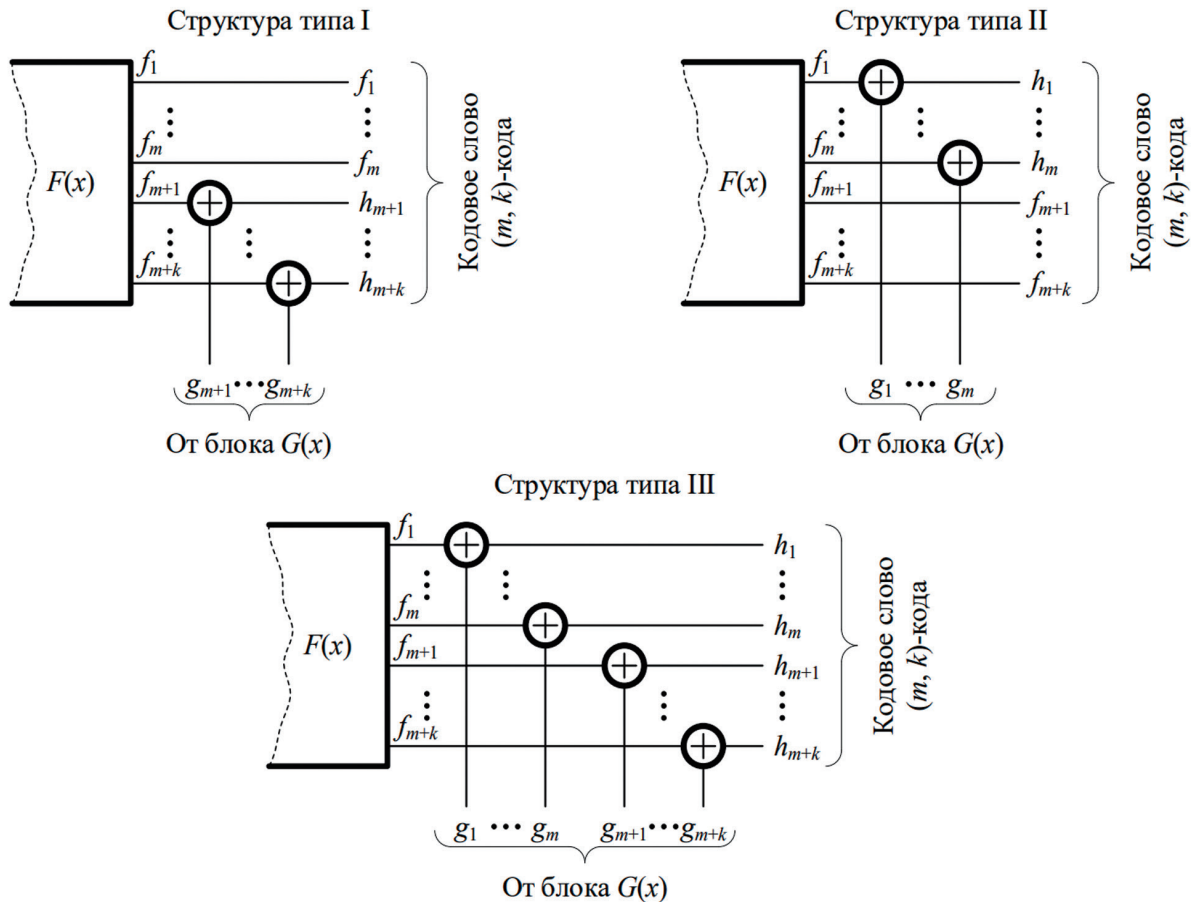


Рис. 1. Каскады элементов преобразования в структурах организации СВК на основе ЛКС с применением (m, k) -кодов.

ждому контрольному вектору соответствует 2^{m-k} информационных векторов. Такое ограничение вызвано вопросами обеспечения самопроверяемости СВК и необходимостью формирования некоторого множества кодовых слов (m, k) -кода для проверки его тестера в процессе эксплуатации (конкретное количество кодовых слов, информационных и контрольных векторов определяется при проектировании СВК с учетом особенностей реализации тестера и условий эксплуатации самопроверяемого устройства) [27–29].

Поставим следующую задачу: определить общее количество способов синтеза СВК по трем различным структурам и оценить возможности использования (m, k) -кодов при этом.

МНОГООБРАЗИЕ СПОСОБОВ СИНТЕЗА СХЕМ ВСТРОЕННОГО КОНТРОЛЯ

В структуре типа I каждый информационный вектор (m, k) -кода однозначно будет определять значения проверочных символов в контрольном векто-

ре. Для выбранных выходов m и k существует только один способ доопределения функций ЛКС. Число способов выбора k преобразуемых функций из $m+k$ определяется величиной C_{m+k}^k . Число вариантов выбора последовательности размещения символов в информационном векторе определяется числом перестановок из m элементов – числом P_m . Число вариантов выбора последовательности размещения символов в контрольном векторе определяется числом перестановок из k элементов – числом P_k . Таким образом, общее число способов организации СВК по структуре типа I с учетом однозначного доопределения функций ЛКС равно:

$$N_I = C_{m+k}^k P_m P_k = \frac{(m+k)!}{k!m!} m!k! = (m+k)! \quad (1)$$

В структуре типа II заполнение на каждом входном наборе не однозначное. Напомним, что рассматривается случай использования (m, k) -кода, при котором информационные векторы распределены между контрольными равномерно (такие коды широко распространены и используются в практике синтеза высоконадежных цифровых схем [30]). Чис-

ло способов выбора m преобразуемых функций из $m+k$ определяется величиной $C_{m+k}^m = C_{m+k}^k$. Число вариантов выбора последовательности размещения символов в контрольном векторе определяется числом перестановок из m элементов — числом P_m . Число вариантов выбора последовательности размещения символов в контрольном векторе определяется числом перестановок из k элементов — числом P_k . На каждой входной комбинации из 2^t можно 2^{m-k} способами доопределить функции так, чтобы был сформирован информационный вектор с необходимым контрольным. При этом должно выполняться условие: $t \geq k$. В противном случае не удастся обеспечить формирование по разу каждого контрольного вектора. Общее число способов доопределения, таким образом, будет равно $2^t 2^{m-k} = 2^{t+m-k}$. Отсюда становится ясно, что число способов построения СВК с учетом отмеченного равно:

$$N_{II} = 2^{t+m-k} C_{m+k}^k P_m P_k = 2^{t+m-k} \frac{(m+k)!}{k!m!} m!k! = 2^{t+m-k} (m+k)! \quad (2)$$

Структура типа III отличается от вышерассмотренных тем, что на каждом из 2^t входных наборов можно получить любое кодовое слово из полного множества кодовых слов (m, k) -кода с учетом необходимости формирования каждого контрольного вектора хотя бы на одном входном наборе. Далее будем полагать, что доопределение будет таковым, что все контрольные векторы будут формироваться на одинаковом числе входных комбинаций, т.е. распределение формируемых контрольных векторов будет равномерно. В таком случае имеем 2^t кодовых слова, распределенных равномерно между 2^k контрольными векторами, или имеем 2^{t-k} кодовых слов с одним и тем же контрольным вектором. Следует отметить естественное ограничение, как и в случае со структурой типа II, величина $t \geq k$.

Число способов выбора m информационных символов из $m+k$ символов, по-прежнему, равно $C_{m+k}^m = C_{m+k}^k$. Число вариантов выбора последовательности размещения символов в информационном векторе определяется числом перестановок из m элементов — числом P_m . Число вариантов выбора

последовательности размещения символов в контрольном векторе определяется числом перестановок из k элементов — числом P_k . При этом на каждом входном наборе можно осуществить доопределение функций ЛКС для получения информационных символов 2^{m-k} способами, поскольку все кодовые слова (их 2^m) распределены равномерно между всеми контрольными векторами (их 2^k); проверочные символы будут получены после единственным способом. Итого, имеем $2^{t-k} 2^{m-k} = 2^{t+m-2k}$ способов доопределения функций логической коррекции.

Но здесь не учитывается, что первый контрольный вектор может быть сформирован на $C_{2^t-2^{t-k}}^{2^{t-k}}$ входных комбинациях; второй — на $C_{2^t-2^{t-k}}^{2^{t-k}}$; третий — на $C_{2^t-2^{t-k}}^{2^{t-k}}$; ...; 2^k -ый — на $C_{2^t-(2^k-1)2^{t-k}}^{2^{t-k}} = C_{2^t-2^{t-k}}^{2^{t-k}} = 1$. Всего число вариантов доопределений с учетом возможных вариантов сочетаний выходов равно:

$$C_{2^t-2^{t-k}}^{2^{t-k}} C_{2^t-2^{t-k}}^{2^{t-k}} C_{2^t-2^{t-k}}^{2^{t-k}} \cdot \dots \cdot C_{2^t-(2^k-1)2^{t-k}}^{2^{t-k}} = \prod_{i=0}^{2^k-1} C_{2^t-i \cdot 2^{t-k}}^{2^{t-k}}$$

С учетом числа способов доопределения, имеем следующее общее число способов построения СВК по структуре типа III:

$$N_{III} = 2^{t+m-2k} C_{m+k}^k P_m \prod_{i=0}^{2^k-1} C_{2^t-i \cdot 2^{t-k}}^{2^{t-k}} = 2^{t+m-2k} (m+k)! \prod_{i=0}^{2^k-1} C_{2^t-i \cdot 2^{t-k}}^{2^{t-k}} \quad (3)$$

Рассмотрим отдельно произведение в формуле (3).

Введем обозначения: $a = 2^{t-k}$, $b = 2^t$. Тогда 2^k можно получить следующим образом: $a = \frac{2^t}{2^k} = \frac{b}{2^k} \Rightarrow 2^k = \frac{b}{a}$. Произведение в выражении (3) с учетом введенных обозначений может быть записано в виде:

$$\begin{aligned} \prod_{i=0}^{2^k-1} C_{2^t-i \cdot 2^{t-k}}^{2^{t-k}} &= \prod_{i=0}^{\frac{b}{a}-1} C_{b-i \cdot a}^a = C_b^a C_{b-a}^a C_{b-2a}^a \cdot \dots \cdot C_{b-\left(\frac{b}{a}-3\right)a}^a C_{b-\left(\frac{b}{a}-2\right)a}^a C_{b-\left(\frac{b}{a}-1\right)a}^a = \\ &= \frac{b!}{a!(b-a)!} \cdot \frac{(b-a)!}{a!(b-2a)!} \cdot \frac{(b-2a)!}{a!(b-3a)!} \times \dots \times \\ &\times \frac{\left(b-\left(\frac{b}{a}-3\right)a\right)!}{a!\left(b-\left(\frac{b}{a}-3\right)a-a\right)!} \cdot \frac{\left(b-\left(\frac{b}{a}-2\right)a\right)!}{a!\left(b-\left(\frac{b}{a}-2\right)a-a\right)!} \cdot \frac{\left(b-\left(\frac{b}{a}-1\right)a\right)!}{a!\left(b-\left(\frac{b}{a}-1\right)a-a\right)!} = \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{b!}{a!(b-a)!} \cdot \frac{(b-a)!}{a!(b-2a)!} \cdot \frac{(b-2a)!}{a!(b-3a)!} \cdot \dots \cdot \frac{(3a)!}{a!(2a)!} \cdot \frac{(2a)!}{a!a!} \cdot \frac{a!}{a!0!} = \\
&= \frac{b!}{a! \cdot 1} \cdot \frac{1}{a! \cdot 1} \cdot \frac{1}{a! \cdot 1} \cdot \dots \cdot \frac{1}{a! \cdot 1} \cdot \frac{1}{a! \cdot 1} \cdot \frac{1}{a! \cdot 1} = \frac{b!}{\underbrace{a! \cdot a! \cdot \dots \cdot a!}_{\frac{b}{a}}} = \frac{b!}{(a!)^{\frac{b}{a}}}
\end{aligned} \quad (4)$$

Вернемся к введенным выше обозначениями и подставим исходные выражения в формулу (4):

$$\prod_{i=0}^{2^k-1} C_{2^t-i \cdot 2^{t-k}}^{2^{t-k}} = \prod_{i=0}^{\frac{b-a}{a}-1} C_{b-i \cdot a}^a = \frac{b!}{(a!)^{\frac{b}{a}}} = \frac{2^t!}{(2^{t-k}!)^{2^k}} \quad (5)$$

Формула (3), описывающая число способов построения СВК по структуре III, с учетом (5) приводится к виду:

$$N_{III} = 2^{t+m-2k} (m+k)! \frac{2^t!}{(2^{t-k}!)^{2^k}} \quad (6)$$

Используя (1), (2) и (6), можно определить для рассматриваемого объекта диагностирования общее количество способов организации СВК на основе ЛКС с применением (m, k) -кода. В табл. 1–3 приведены результаты расчетов для некоторых значений t , m и k для всех трех структур. К примеру, при исходных данных $t = 4$, $m = 4$, $k = 2$ число способов организации СВК по структурам типа I, II и III равно $N_I = 720$, $N_{II} = 46080$, $N_{III} = 726485760000$. Из сравнения данных такого простого примера следует, что структура типа III обладает более высокой вариативностью, чем первые две структуры: существует в 1009008000 раз больше вариантов ее построения, чем по структуре типа I и в 15765750 раз, чем по структуре типа II.

Из сравнения же формул (1), (2) и (6) непосредственно следует, что представляет интерес исследование способов формирования алгоритмов построения СВК на основе структур типа II и III, тогда как

Таблица 1. Число способов организации СВК по структуре типа I

m	k		
	2	3	4
4	720	5 040	40 320
5	5 040	40 320	362 880
6	40 320	362 880	3 628 800
7	362 880	3 628 800	39 916 800
8	3 628 800	39 916 800	479 001 600
9	39 916 800	479 001 600	6 227 020 800
10	479 001 600	6 227 020 800	87 178 291 200

по структуре типа I число способов определяется исключительно вариантами выбора выходов для преобразования и перестановок выходов внутри информационного и контрольного векторов.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧИСЛА СПОСОБОВ ОРГАНИЗАЦИИ СХЕМ ВСТРОЕННОГО КОНТРОЛЯ ПО РАЗЛИЧНЫМ СТРУКТУРАМ ПРИ УВЕЛИЧЕНИИ ЧИСЛА ВЫХОДОВ ОБЪЕКТА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

4.1. Свойства структур, проявляющиеся при увеличении числа выделяемых информационных символов при постоянстве числа проверочных символов

Установим, как изменяется общее число вариантов построения СВК по структурам всех трех типов.

Определим, как изменится число вариантов построения СВК по структуре типа I с увеличением m на 1 при неизменном k :

$$\delta_I^{m+1, m} = \frac{((m+1)+k)!}{(m+k)!} = m+k+1 \quad (7)$$

Найдем, как изменится число вариантов построения СВК по структуре типа I с увеличением m на 2 при неизменном k :

$$\begin{aligned}
\delta_I^{m+2, m} &= \frac{((m+2)+k)!}{(m+k)!} = \\
&= (m+k+1)(m+k+2) = (m+k+2)^2
\end{aligned} \quad (8)$$

Обобщим (7) и (8) и найдем, как изменится число вариантов построения СВК по структуре типа I с увеличением m на произвольное $p \in \mathbb{N}$ при неизменном k :

$$\begin{aligned}
\delta_I^{m+p, m} &= \frac{((m+p)+k)^k}{(m+k)^k} = \\
&= (m+k+1)(m+k+2) \cdot \dots \cdot (m+k+p) = \\
&= (m+k+p)^p
\end{aligned} \quad (9)$$

Таким образом, справедливо следующее умозаключение.

Утверждение 1. При увеличении числа информационных символов при постоянном значении числа проверочных символов на величину $p \in \mathbb{N}$ общее число способов построения СВК на основе ЛКС

Таблица 2. Число способов организации СВК по структуре типа II

t	m	k		
		2	3	4
2	4	11 520	—	—
2	5	161 280	—	—
2	6	2 580 480	—	—
2	7	46 448 640	—	—
2	8	928 972 800	—	—
2	9	20 437 401 600	—	—
2	10	490 497 638 400	—	—
...	...	...	...	...
3	4	23 040	80 640	—
3	5	322 560	1 290 240	—
3	6	5 160 960	23 224 320	—
3	7	92 897 280	464 486 400	—
3	8	1 857 945 600	10 218 700 800	—
3	9	40 874 803 200	245 248 819 200	—
3	10	980 995 276 800	6 376 469 299 200	—
...	...	...	...	...
4	4	46 080	161 280	645 120
4	5	645 120	2 580 480	11 612 160
4	6	10 321 920	46 448 640	232 243 200
4	7	185 794 560	928 972 800	5 109 350 400
4	8	3 715 891 200	20 437 401 600	122 624 409 600
4	9	81 749 606 400	490 497 638 400	3 188 234 649 600
4	10	1 961 990 553 600	12 752 938 598 400	89 270 570 188 800

с применением заданного (m, k) -кода по структуре типа I увеличивается в $(m + k + p)^p$ раз.

Аналогично изложенному выше найдем, как изменится число вариантов построения СВК по структуре типа II с увеличением m на 1 при неизменном k :

$$\delta_{II}^{m+1, m} = \frac{2^{t+(m+1)-k} ((m+1) + k)!}{2^{t+m-k} (m+k)!} = 2(m+k+1) \quad (10)$$

Установим, как меняется число вариантов построения СВК по структуре типа II с увеличением m на произвольную величину $p \in \mathbb{N}$ при неизменном k :

$$\begin{aligned} \delta_{II}^{m+p, m} &= \frac{2^{t+(m+p)-k} ((m+p) + k)!}{2^{t+m-k} (m+k)!} = \\ &= 2^p (m+k+1)(m+k+2) \cdot \dots \cdot (m+k+p) = \\ &= 2^p (m+k+p)^p \end{aligned} \quad (11)$$

С увеличением m на 1 при неизменном k для структуры типа III число способов построения СВК изменяется на величину:

$$\delta_{III}^{m+1, m} = \frac{2^{t+(m+1)-2k} ((m+1) + k)! \frac{2^t!}{(2^{t-k}!)^{2^k}}}{2^{t+m-2k} (m+k)! \frac{2^t!}{(2^{t-k}!)^{2^k}}} = \quad (12)$$

$$= 2(m+k+1)$$

С учетом полученных ранее закономерностей (см. формулу 9), установим, как меняется число вариантов построения СВК по структуре типа III с увеличением m на произвольную величину $p \in \mathbb{N}$ при неизменном k .

Таблица 3. Число способов организации СВК по структуре типа III

t	m	k		
		2	3	4
2	4	69 120	—	—
2	5	967 680	—	—
2	6	15 482 880	—	—
2	7	278 691 840	—	—
2	8	5 573 836 800	—	—
2	9	122 624 409 600	—	—
2	10	2 942 985 830 400	—	—
...	...	...	...	...
3	4	14 515 200	406 425 600	—
3	5	203 212 800	6 502 809 600	—
3	6	3 251 404 800	117 050 572 800	—
3	7	58 525 286 400	2 341 011 456 000	—
3	8	1 170 505 728 000	51 502 252 032 000	—
3	9	25 751 126 016 000	1 236 054 048 768 000	—
3	10	618 027 024 384 000	32 137 405 267 968 000	—
...	...	...	...	...
4	4	726 485 760 000	1 647 669 703 680 000	843 606 888 284 160 000
4	5	10 170 800 640 000	26 362 715 258 880 000	15 184 923 989 114 880 000
4	6	162 732 810 240 000	474 528 874 659 840 000	303 698 479 782 297 600 000
4	7	2 929 190 584 320 000	9 490 577 493 196 800 000	6 681 366 555 210 547 200 000
4	8	58 583 811 686 400 000	208 792 704 850 329 600 000	160 352 797 325 053 132 800 000
4	9	1 288 843 857 100 800 000	5 011 024 916 407 910 400 000	4 169 172 730 451 381 452 800 000
4	10	30 932 252 570 419 200 000	130 286 647 826 605 670 4000 000	116 736 836 452 638 680 678 400 000

$$\delta_{III}^{m+p,m} = \frac{2^{t+(m+1)-2k} ((m+1)+k)! \frac{2^t!}{(2^{t-k}!)^{2^k}}}{2^{t+m-2k} (m+k)! \frac{2^t!}{(2^{t-k}!)^{2^k}}} = 2^p (m+k+p)^p \quad (13)$$

Утверждение 2. При увеличении числа информационных символов при постоянном значении числа проверочных символов на величину $p \in \mathbb{N}$ общее число способов построения СВК на основе ЛКС с применением заданного (m, k) -кода по структурам типа II и III увеличивается в $2^p (m+k+p)^p$ раз.

4.2. Свойства структур, проявляющиеся при увеличении числа выделяемых проверочных символов при постоянстве числа информационных символов

Рассмотрим, как меняется общее количество способов синтеза СВК на основе ЛКС с применением заданного (m, k) -кода в случае изменения

числа выделяемых проверочных символов при постоянстве числа информационных символов.

Анализ (7)–(9) приводит к следующему умозаключению.

Утверждение 3. При увеличении числа проверочных символов при постоянном значении числа информационных символов на величину $p \in \mathbb{N}$ общее число способов построения СВК на основе ЛКС с применением заданного (m, k) -кода по структуре типа I увеличивается в $(m+k+p)^p$ раз.

Установим, как меняется число вариантов построения СВК по структуре типа II с увеличением k на произвольную величину $p \in \mathbb{N}$ при неизменном m :

$$\delta_{II}^{k+p,k} = \frac{2^{t+m-(k+p)} (m+(k+p))!}{2^{t+m-k} (m+k)!} = 2^{-p} (m+k+1)(m+k+2) \cdot \dots \cdot (m+k+p) = \quad (14)$$

$$= 2^{-p} (m + k + p)^p$$

Выражение (14) доказывает следующее положение:

Утверждение 4. При увеличении числа проверочных символов при постоянном значении числа информационных символов на величину $p \in \mathbb{N}$ общее число способов построения СВК на основе ЛКС с применением заданного (m, k) -кода по структуре типа II изменяется в $2^{-p} (m + k + p)^p$ раз.

Пользуясь (6), найдем, как меняется число вариантов построения СВК по структуре типа III с увеличением k на произвольную величину $p \in \mathbb{N}$ при неизменном m :

$$\begin{aligned} \delta_{III}^{k+p, k} &= \frac{2^{t+m-2(k+p)} (m + (k + p))! \frac{2^t!}{(2^{t-(k+p)}!)^{2^{k+p}}}}{2^{t+m-2k} (m + k)! \frac{2^t!}{(2^{t-k}!)^{2^k}}} = \\ &= 2^{-2p} (m + k + p)^p \frac{(2^{t-k}!)^{2^k}}{(2^{t-(k+p)}!)^{2^{k+p}}} = \\ &= \frac{(2^{t-k}!)^{2^k} (m + k + p)^p}{4^p (2^{t-k-p}!)^{2^{k+p}}} \end{aligned} \quad (15)$$

Выражение (15) приводит к такому положению:

Утверждение 5. При увеличении числа проверочных символов при постоянном значении числа информационных символов на величину $p \in \mathbb{N}$ общее число способов построения СВК на основе ЛКС с применением заданного (m, k) -кода по структуре

типа III изменяется в $\frac{(2^{t-k}!)^{2^k} (m + k + p)^p}{4^p (2^{t-k-p}!)^{2^{k+p}}}$ раз.

Отметим, что могут быть установлены аналогичные свойства структур типов I, II и III, проявляющиеся при увеличении числа проверочных символов при постоянстве числа информационных символов (m, k) -кода, а также проявляющиеся при изменении как чисел m , так и k .

4.3. Сравнение числа способов синтеза СВК на основе структур различных типов

Найдем отношение величины N_{II} к N_I :

$$\chi_{II, I} = \frac{N_{II}}{N_I} = \frac{2^{t+m-k} (m + k)!}{(m + k)!} = 2^{t+m-k} \quad (16)$$

Выражение (16) доказывает следующее положение:

Утверждение 6. Общее число способов построения СВК на основе ЛКС с применением заданного (m, k) -кода по структуре типа II для одних и тех же t , m и k больше в 2^{t+m-k} раз, чем аналогичное число для структуры типа I.

Найдем отношение величины N_{III} к N_I :

$$\begin{aligned} \chi_{III, I} &= \frac{N_{III}}{N_I} = \frac{2^{t+m-2k} (m + k)! \frac{2^t!}{(2^{t-k}!)^{2^k}}}{(m + k)!} = \\ &= 2^{t+m-2k} \frac{2^t!}{(2^{t-k}!)^{2^k}} \end{aligned} \quad (17)$$

Конечное выражение в (17) свидетельствует о следующем:

Утверждение 7. Общее число способов построения СВК на основе ЛКС с применением заданного (m, k) -кода по структуре типа III для одних и тех же t , m и k больше в $2^{t+m-2k} \frac{2^t!}{(2^{t-k}!)^{2^k}}$ раз, чем аналогичное число для структуры типа I.

И, наконец, найдем отношение величины N_{III} к N_{II} :

$$\begin{aligned} \chi_{III, II} &= \frac{N_{III}}{N_{II}} = \frac{2^{t+m-2k} (m + k)! \frac{2^t!}{(2^{t-k}!)^{2^k}}}{2^{t+m-k} (m + k)!} = \\ &= 2^{-k} \frac{2^t!}{(2^{t-k}!)^{2^k}} \end{aligned} \quad (18)$$

Становится ясным следующее:

Утверждение 8. Общее число способов построения СВК на основе ЛКС с применением заданного (m, k) -кода по структуре типа III для одних и тех же t , m и k больше в $2^{-k} \frac{2^t!}{(2^{t-k}!)^{2^k}}$ раз, чем аналогичное число для структуры типа II.

Установим, как изменяется значение $\chi_{II, I}$ с увеличением m на 1:

$$\chi_{II, I}^{m, m+1} = \frac{2^{t+(m+1)-k}}{2^{t+m-k}} = 2 \quad (19)$$

Обобщим результат и определим, как изменяется значение $\chi_{II, I}$ с увеличением m на произвольное $q \in \mathbb{N}$:

$$\chi_{II, I}^{m, m+q} = \frac{2^{t+(m+q)-k}}{2^{t+m-k}} = 2^q \quad (20)$$

Аналогично определим, как изменяется значение $\chi_{III, I}$ с увеличением m на 1:

$$\chi_{III, I}^{m, m+1} = \frac{2^{t+(m+1)-2k} \frac{2^t!}{(2^{t-k}!)^{2^k}}}{2^{t+m-2k} \frac{2^t!}{(2^{t-k}!)^{2^k}}} = 2 \quad (21)$$

Обобщим результат и определим, как изменяется значение $\chi_{III, I}$ с увеличением m на произвольное $q \in \mathbb{N}$:

$$\chi_{III, I}^{m, m+q} = \frac{2^{t+(m+q)-2k} \frac{2^t!}{(2^{t-k}!)^{2^k}}}{2^{t+m-2k} \frac{2^t!}{(2^{t-k}!)^{2^k}}} = 2^q \quad (22)$$

Из сравнения (20) и (22) следует, что при увеличении m на произвольное натуральное число q значения величин $\chi_{II, I}$ и $\chi_{III, I}$ изменяются одинаково. Из (18) следует, что величина $\chi_{III, II}$ с увеличением m на произвольное натуральное число q не меняется.

Утверждение 9. Величины $\chi_{II, I}$ и $\chi_{III, I}$ не зависят от числа m и при увеличении на q изменяются одинаково в 2^q раз.

Утверждение 10. Величина $\chi_{III, II}$ не зависит от числа m и при увеличении на q не изменяется.

Отмеченные в настоящем разделе свойства структур типа I, II и III могут учитываться на практике при выборе способа организации СВК на основе ЛКС с применением заданного (m, k) -кода.

УЧЕТ ЧИСЛА СПОСОБОВ РЕАЛИЗАЦИИ СВК НА ПРАКТИКЕ

Рассмотрим примеры применения полученных в исследовании зависимостей.

Пример 1. Даны устройства $F_1(x)$ и $F_2(x)$ с одинаковым числом входов $t = 4$ и $n_1 = 10$ и $n_2 = 12$ выходами. Определить число способов организации СВК на основе ЛКС с применением (m, k) -кода, удовлетворяющего введенным ранее ограничениям, по структурам типа I, II и III при $k = 2$ и установить, во сколько раз больше способов построения СВК для устройства $F_2(x)$, чем для устройства $F_1(x)$, для каждой из структур.

Рассматриваемый пример можно дополнить рис. 2, где приведены устройства и их параметры.

Используем формулы (1), (2) и (6) и определим числа N_I , N_{II} , N_{III} для структур трех типов, организуемых для устройства $F_1(x)$:

$$N_I = (8 + 2)! = 10! = 3\,628\,800$$

$$N_{II} = 2^{4+8-2} (8 + 2)! = 3\,715\,891\,200$$

$$N_{III} = 2^{4+8-2 \cdot 2} (8 + 2)! \frac{2^4!}{(2^{4-2}!)^{2^2}} =$$

$$= 58\,583\,811\,686\,400\,000$$

Аналогично для $F_2(x)$ имеем:

$$N_I = (10 + 2)! = 12! = 479\,001\,600$$

$$N_{II} = 2^{4+10-2} (10 + 2)! = 1\,961\,990\,553\,600$$

$$N_{III} = 2^{4+10-2 \cdot 2} (10 + 2)! \frac{2^4!}{(2^{4-2}!)^{2^2}} =$$

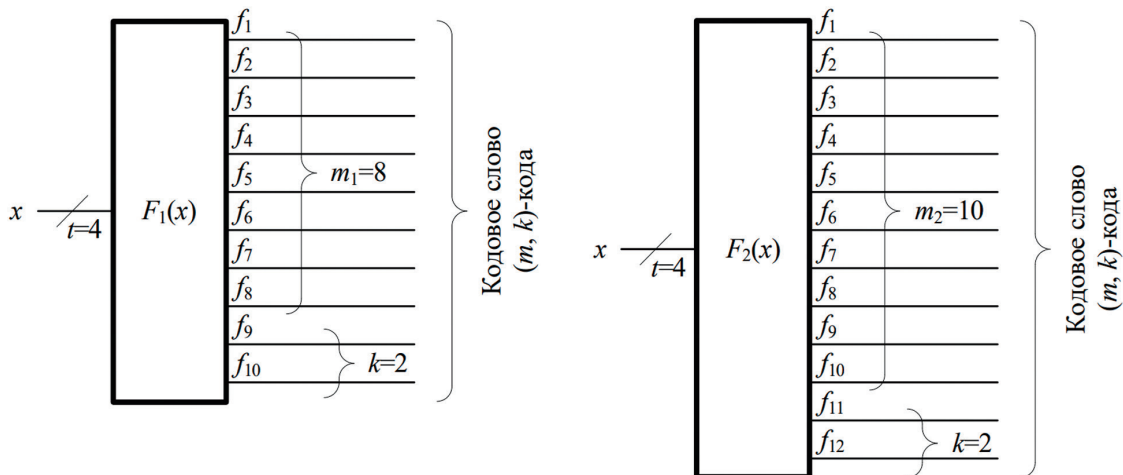


Рис. 2. Заданные устройства $F_1(x)$ и $F_2(x)$.

= 30 932 252 570 419 200 000

Читатель может найти те же данные в табл. 1–3.

С использованием формулы (8), найдем значение следующего выражения:

$$\delta_I^{10,8} = (8 + 2 + 2)^2 = (8 + 2 + 1)(8 + 2 + 2) = 11 \cdot 12 = 132$$

Далее используем (11) при $p = 2$:

$$\delta_{II}^{10,8} = 2^2 (8 + 2 + 2)^2 = 2^2 (8 + 2 + 1)(8 + 2 + 2) = 4 \cdot 11 \cdot 12 = 528$$

Формула (13) для рассматриваемого случая $p = 2$ дает аналогичный результат:

$$\delta_{III}^{10,8} = 2^2 (8 + 2 + 2)^2 = 528$$

Пример 2. Дано устройство $F(x)$ с числом входов $t = 4$ и выходов $n = 16$. Требуется установить число способов синтеза СВК на основе ЛКС по структурам всех трех типов с учетом контроля всех выходов на основе (m, k) -кода, удовлетворяющего введенным ранее ограничениям, при $k = 2$, а также при делении выходов на два подмножества одинаковой мощности и контроля каждого из них на основе аналогичных структур, а также определить, во сколько раз больше окажется число способов синтеза СВК в случае контроля всех выходов на основе одного кода.

Рассматриваемый пример можно проиллюстрировать рис. 3.

Используем те же формулы (1), (2) и (6) и определим числа N_I , N_{II} , N_{III} для структур трех типов,

организуемых для устройства $F(x)$ при его контроле на основе заданного кода:

$$N_I = (14 + 2)! = 16! = 20\,922\,789\,888\,000$$

$$N_{II} = 2^{4+14-2} (14 + 2)! = 1\,371\,195\,958\,099\,968\,000$$

$$N_{III} = 2^{4+14-2 \cdot 2} (14 + 2)! \frac{2^4!}{(2^{4-2}!)^2} = 21\,617\,932\,676\,414\,570\,496 \cdot 10^6$$

Разобьем выходы на две группы по 8 выходов в каждой и организуем контроль каждой из них на основе всех трех структур. Получаем следующее число способов организации СВК:

$$N_I = ((6 + 2)!)^2 = (8!)^2 = 1\,625\,702\,400$$

$$N_{II} = (2^{4+6-2} (6 + 2)!)^2 = 106\,542\,032\,486\,400$$

$$N_{III} = \left(2^{4+6-2 \cdot 2} (6 + 2)! \frac{2^4!}{(2^{4-2}!)^2} \right)^2 = 264\,819\,675\,286\,078 \cdot 10^{14}$$

Таким образом, число вариантов организации СВК на основе ЛКС и рассматриваемого (m, k) -кода по структурам типа I и II больше числа вариантов организации СВК для двух выделяемых подмножеств в 12870 раз. Для структуры типа III

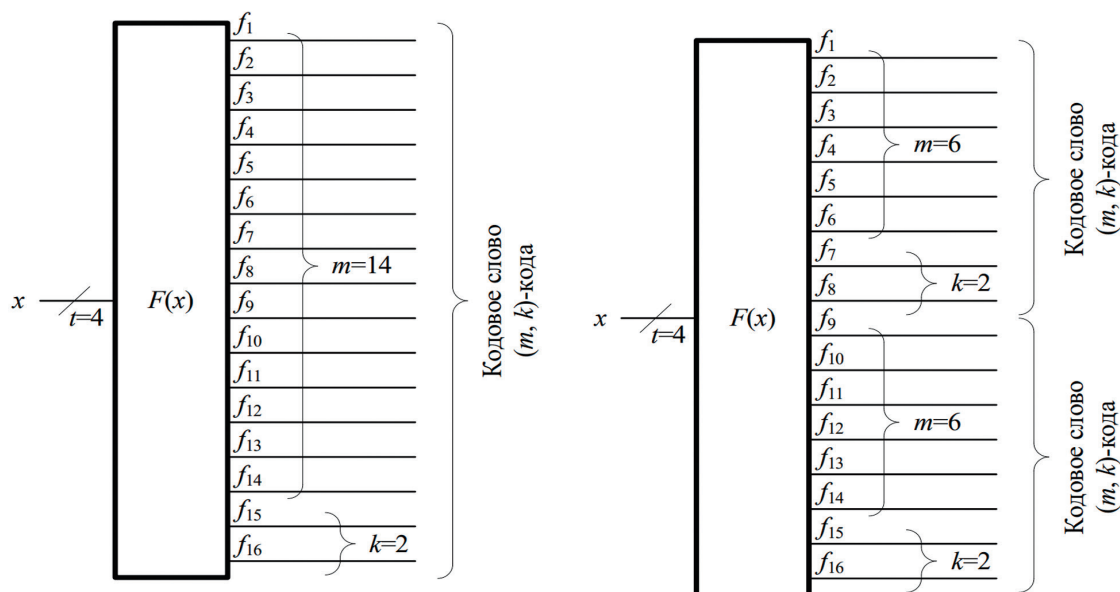


Рис. 3. Принцип организации контроля вычислений по рассматриваемому примеру.

число вариантов организации СВК, наоборот, уменьшилось в 1225 раз.

Могут быть рассмотрены и иные примеры, демонстрирующие эффективность использования установленных в настоящей статье свойств структур типов I, II и III.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Большое число способов организации СВК на основе ЛКС с применением (m, k) -кодов позволяет на практике не только синтезировать различные по показателям структурной избыточности устройства с обнаружением неисправностей, но и гораздо проще обеспечивать их самопроверяемость, чем при использовании традиционной структуры, подразумевающей единственную реализацию для выбранного кода (при условии заданных элементной базы и способов синтеза контрольных элементов).

Наибольшей вариативностью обладает структура типа III, позволяющая синтезировать гигантское количество СВК на основе ЛКС с применением (m, k) -кодов. Несколько меньшей вариативностью обладает структура типа II и наименее вариативной является структура типа I, где число способов организации СВК определяется только числом вариантов выбора преобразуемых выходов и перестановками внутри групп преобразуемых и не преобразуемых выходов.

Установленные в ходе исследования закономерности позволяют на практике оценивать общее количество способов синтеза СВК на основе ЛКС с применением (m, k) -кодов и выбирать наилучшие из них для реализации самопроверяемых цифровых устройств.

Наличие большого числа способов синтеза СВК на основе ЛКС является одновременно и достоинством и недостатком, поскольку даже при малых значениях $m = 8 \dots 10$ процедура выбора наилучшего способа по заданному критерию (например, структурной избыточности СВК или равномерности формирования тестовых комбинаций для ее элементов) трудоемка. На практике целесообразно искать квазиоптимальные варианты организации СВК.

Следует также отметить, что здесь не рассматривались некоторые возможные ограничения на процедуру синтеза СВК, например, формирование неполного множества входных воздействий на объект диагностирования или же возможность использования только подмножества кодовых слов заданного (m, k) -кода для организации контроля и пр. Все эти способы будут являться частными случаями рассмотренных и могут быть исследованы дополнительно.

Использование ЛКС с применением (m, k) -кодов — это тот подход, который может оказаться весьма эффективным при синтезе устройств с обнаружением неисправностей для использования в составе систем управления ответственными технологическими процессами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Согомонян Е.С., Слабаков Е.В. Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы. М.: Радио и связь, 1989, 208 с.
2. Mikoni S. Top Level Diagnostic Models of Complex Objects // Lecture Notes in Networks and Systems.— 2022.— Vol. 442.— Pp. 238–249. DOI: 10.1007/978-3-030-98832-6_21.
3. Drozd A., Kharchenko V., Antoshchuk S., Sulima J., Drozd M. Checkability of the Digital Components in Safety-Critical Systems: Problems and Solutions // Proceedings of 9th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2011), Sevastopol, Ukraine, 2011, pp. 411–416. doi: 10.1109/EWDTS.2011.6116606.
4. Drozd O., Perebeinos I., Martynyuk O., Zashcholkina K., Ivanova O., Drozd M. Hidden Fault Analysis of FPGA Projects for Critical Applications // Proceedings of the IEEE International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), 25–29 February 2020, Lviv-Slavsko, Ukraine, paper 142. doi: 10.1109/TCSET49122.2020.235591.
5. Göessel M., Ocheretny V., Sogomonyan E., Marienfeld D. New Methods of Concurrent Checking: Edition 1.— Dordrecht: Springer Science+Business Media B.V., 2008, 184 p.
6. Borecký J., Kohlík M., Kubátová H. Parity Driven Reconfigurable Duplex System // Microprocessors and Microsystems.— 2017.— Vol. 52.— Pp. 251–260. doi: 10.1016/j.micpro.2017.06.015.
7. Tshagharyan G., Harutyunyan G., Shoukourian S., Zorian Y. Experimental Study on Hamming and Hsiao Codes in the Context of Embedded Applications // Proceedings of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017), Novi Sad, Serbia, September 29 – October 2, 2017, pp. 25–28. doi: 10.1109/EWDTS.2017.8110065.
8. Сапожников В.В., Сапожников Вл.В., Ефанов Д.В. Коды с суммированием для систем технического диагностирования. Том 1: Классические коды Бергера и их модификации.— М.: Наука, 2020, 383 с.
9. Сапожников В.В., Сапожников Вл.В., Ефанов Д.В. Коды с суммированием для систем технического диагностирования. Том 2: Взвешенные коды с суммированием.— М.: Наука, 2021, 455 с.
10. Stempkovsky A.L., Zhukova T.D., Telpukhov D.V., Gurov S.I. CICADA: A New Tool to Design Circuits with Correction and Detection Abilities // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), 13–15 May 2021, Kazan, Russia pp. 1–5. doi: 10.1109/SIBCON50419.2021.9438900.
11. Nicolaidis M. On-Line Testing for VLSI: State of the Art and Trends // Integration, the VLSI Journal, 1998, Vol. 26, Issues 1–2, pp. 197–209. doi: 10.1016/S0167-9260(98)00028-5.
12. Mitra S., McCluskey E.J. Which Concurrent Error Detection Scheme to Choose? // Proceedings of International

- Test Conference, 2000, USA, Atlantic City, NJ, 03–05 October 2000, pp. 985–994.
doi: 10.1109/TEST.2000.894311.
13. Ефанов Д.В., Сапожников В.В., Сапожников Вл.В. О свойствах кода с суммированием в схемах функционального контроля // Автоматика и телемеханика. — 2010. — № 6. — С. 155–162.
 14. Гессель М., Морозов А.В., Сапожников Вл.В., Сапожников Вл.В. Контроль комбинационных схем методом логического дополнения // Автоматика и телемеханика. — 2005. — № 8. — С. 161–172.
 15. Гессель М., Морозов А.В., Сапожников Вл.В., Сапожников Вл.В. Логическое дополнение — новый метод контроля комбинационных схем // Автоматика и телемеханика. — 2003. — № 1. — С. 167–176.
 16. Sen S.K. A Self-Checking Circuit for Concurrent Checking by 1-out-of-4 code with Design Optimization using Constraint Don't Cares // National Conference on Emerging trends and advances in Electrical Engineering and Renewable Energy (NCEEERE2010), Sikkim Manipal Institute of Technology, Sikkim, held during 22–24 December, 2010.
 17. Das D.K., Roy S.S., Dmitriev A., Morozov A., Gössel M. Constraint Don't Cares for Optimizing Designs for Concurrent Checking by 1-out-of-3 Codes // Proceedings of the 10th International Workshops on Boolean Problems, Freiberg, Germany, September, 2012, pp. 33–40.
 18. Пивоваров Д.В. Построение систем функционального контроля многовыходных комбинационных схем методом логического дополнения по равновесным кодам // Автоматика на транспорте. — 2018. — Том 4. — № 1. — С. 131–149.
 19. Morozov M., Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov Vl.V., Goessel M. New Self-Checking Circuits by Use of Berger-codes // Proceedings of 6th IEEE International On-Line Testing Workshop, Palma De Mallorca, Spain, 3–5 July 2000, pp. 171–176.
 20. Efanov D.V., Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov Vl.V. The Self-Checking Concurrent Error-Detection Systems Synthesis Based on the Boolean Complement to the Bose-Lin Codes with the Modulo Value $M=4$ // Electronic Modeling. — 2021. — Vol. 43. — Issue 1. — Pp. 28–45.
DOI: 10.15407/emodel.43.01.028.
 21. Ефанов Д.В., Зуева М.В. Свойства кодов Сяо в системах технического диагностирования дискретных устройств // Программная инженерия. — 2023. — Т. 14. — № 7. — С. 339–349.
DOI: 10.17587/prin.14.339–349.
 22. Sapozhnikov Vl.V., Dmitriev A., Goessel M., Sapozhnikov V.V. Self-Dual Parity Checking — a New Method for on Line Testing // Proceedings of 14th IEEE VLSI Test Symposium, USA, Princeton, 1996, pp. 162–168.
 23. Гессель М., Дмитриев А.В., Сапожников Вл.В., Сапожников В.В. Обнаружение неисправностей в комбинационных схемах с помощью самодвойственного контроля // Автоматика и телемеханика. — 2000. — № 7. — С. 140–149.
 24. Efanov D., Sapozhnikov V., Sapozhnikov Vl., Osadchy G., Pivovarov D. Self-Dual Complement Method up to Constant-Weight Codes for Arrangement of Combinational Logical Circuits Concurrent Error-Detection Systems // Proceedings of 17th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2019), Batumi, Georgia, September 13–16, 2019, pp. 136–143.
doi: 10.1109/EWDTS.2019.8884398.
 25. Efanov D.V., Pivovarov D.V. The Hybrid Structure of a Self-Dual Built-In Control Circuit for Combinational Devices with Pre-Compression of Signals and Checking of Calculations by Two Diagnostic Parameters // Proceedings of 19th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2021), Batumi, Georgia, September 10–13, 2021, pp. 200–206.
doi: 10.1109/EWDTS52692.2021.9581019.
 26. Пашуков А.В. Применение взвешенных кодов с суммированием при синтезе схем встроенного контроля по методу логического дополнения // Автоматика на транспорте. — 2022. — Том 8. — № 1. — С. 101–114.
DOI: 10.20295/2412–9186–2022–8–01–101–114.
 27. Ефанов Д.В., Елина Е.И. Исследование алгоритмов синтеза самопроверяемых цифровых устройств на основе логической коррекции сигналов с применением взвешенных кодов Боуза–Лина // Автоматика на транспорте. — 2024. — Том 10. — № 1. — С. 74–99.
DOI: 10.20296/2412–9186–2024–10–01–74–99.
 28. Ефанов Д.В. Синтез самопроверяемых комбинационных устройств на основе метода логической коррекции сигналов с применением кодов Боуза–Лина // Информационные технологии. — 2023. — Том 29. — № 10. — С. 503–511.
DOI: 10.17587/it.29.503–511.
 29. Efanov D.V., Yelina Y.I. Synthesis of Concurrent Error-Detection Circuits Based on Boolean Signals Correction Using Modular Weight-Based Sum Codes // Proceedings of the 2024 Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EICon), 29–30 January 2024, St. Petersburg, Russia, pp. 350–355.
doi: 10.1109/EICon61730.2024.10468328.
 30. Сапожников В.В., Сапожников Вл.В., Ефанов Д.В. Коды Хэмминга в системах функционального контроля логических устройств: монография. — СПб.: Наука, 2018, 151 с.

INVESTIGATION OF WAYS TO SYNTHESIZE CONCURRENT ERROR-DETECTION CIRCUITS BASED ON BOOLEAN SIGNALS CORRECTION USING UNIFORM SEPARABLE CODES

© 2024 D. V. Efanov^{1,2,3,4,*}, Y. I. Yelina^{1,**}

¹ Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

² Russian University of Transport, Moscow, Russia

³ Tashkent State Transport University, Tashkent, Uzbekistan

⁴ «Transport and Construction Safety» LLC, St. Petersburg, Russia

*E-mail: TrES-4b@yandex.ru

**E-mail: eseniya-elina@mail.ru

The features of the synthesis of concurrent error-detection circuit based on the Boolean signals correction using uniform separable codes are investigated. Three types of structures are considered: type I – structure with correction of part of the signals from the outputs of the diagnostic object forming the check symbols of a given code in the concurrent error-detection circuit; type II – structure with correction of part of the signals from the outputs of the diagnostic object forming the data symbols of a given code in the concurrent error-detection circuit; type III – structure with signal correction from all outputs of the diagnostic object. For structures of all types, formulas are given for determining the number of ways to synthesize concurrent error-detection circuit based on the Boolean signals correction using a given code. New properties of structures have been established that characterize the features of the growth in the number of methods for synthesizing concurrent error-detection circuit with an increase in the number of outputs forming data and check symbols. Patterns have been found that allow in practice to estimate the number of ways to synthesize concurrent error-detection circuit based on the Boolean signals correction using uniform separable codes in order to select the best one according to specified criteria. Examples are given to demonstrate the effectiveness of using the found patterns.

Keywords: self-checking digital devices, Boolean signals correction, uniform separable codes in fault detection tasks, synthesis of concurrent error-detection circuit

REFERENCES

1. *Sogomonyan E.S. and Slabakov E.V.* Self-Checking Devices and Fault-Tolerant Systems // in Moscow: Radio i Svyaz', pp. 208, 1989 (in Russian).
2. *Mikoni S.* Top Level Diagnostic Models of Complex Objects // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2022. – Vol. 442. – Pp. 238–249. DOI: 10.1007/978-3-030-98832-6_21.
3. *Drozd A., Kharchenko V., Antoshchuk S., Sulima J., Drozd M.* Checkability of the Digital Components in Safety-Critical Systems: Problems and Solutions // Proceed-ings of 9th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2011), Sevastopol, Ukraine, 2011, pp. 411–416. doi: 10.1109/EWDTS.2011.6116606.
4. *Drozd O., Perebeinos I., Martynyuk O., Zashcholkina K., Ivanova O., Drozd M.* Hidden Fault Analysis of FPGA Projects for Critical Applications // Proceedings of the IEEE International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Tele-communications and Computer Engineering (TCSET), 25–29 February 2020, Lviv-Slavsko, Ukraine, paper 142. doi: 10.1109/TCSET49122.2020.235591.
5. *Göessel M., Ocheretny V., Sogomonyan E., Marienfeld D.* New Methods of Con-current Checking: Edition 1. – Dordrecht: Springer Science+Business Media B.V., 2008, 184 p.
6. *Borecký J., Kohlík M., Kubátová H.* Parity Driven Reconfigurable Duplex System // Microprocessors and Microsystems. – 2017. – Vol. 52. – Pp. 251–260, doi: 10.1016/j.micpro.2017.06.015.
7. *Tshagharyan G., Harutyunyan G., Shoukourian S., Zorian Y.* Experimental Study on Hamming and Hsiao Codes in the Context of Embedded Applications // Proceed-ings of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017), Novi Sad, Serbia, September 29 – October 2, 2017, pp. 25–28. doi: 10.1109/EWDTS.2017.8110065.
8. *Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I., Efanov D.V.* Summation codes for technical diagnostics systems. Vol. 1: Classical Berger codes and their modifications. – M.: Nauka, 2020, 383 p. (in Russian).
9. *Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I., Efanov D.V.* Summation codes for technical diagnostics systems. Vol. 2: Weighted codes with summation. – M.: Nauka, 2021, 455 p. (in Russian).
10. *Stempkovsky A.L., Zhukova T.D., Telpukhov D.V., Gurov S.I.* CICADA: A New Tool to Design Circuits with Correction and Detection Abilities // International Siberian Conference on Control and Communications

- (SIBCON), 13–15 May 2021, Kazan, Russia pp. 1–5. doi: 10.1109/SIBCON50419.2021.9438900.
11. Nicolaidis M. On-Line Testing for VLSI: State of the Art and Trends // *Integration, the VLSI Journal*, 1998, Vol. 26, Issues 1–2, pp. 197–209. doi: 10.1016/S0167-9260(98)00028-5.
 12. Mitra S., McCluskey E.J. Which Concurrent Error Detection Scheme to Choose? // *Proceedings of International Test Conference*, 2000, USA, Atlantic City, NJ, 03–05 October 2000, pp. 985–994. doi: 10.1109/TEST.2000.894311.
 13. Efanov D.V., Sapozhnikov V.I. and Sapozhnikov V.I. On Summation Code Properties in Functional Control Circuits // *Automation and Remote Control*, 2010, no. 6, pp. 155–162. (in Russian).
 14. Goessel M., Morozov A.V., Sapozhnikov V.I. and Sapozhnikov V.V. Checking Combinational Circuits by the Method of Logic Complement // *Automation and Remote Control*, vol. 66, No 8, pp. 1336–1346, 2005. (in Russian).
 15. Gessel M., Morozov A.V., Sapozhnikov V.V. and Sapozhnikov V.V. Logic Complement a New Method of Checking the Combinational Circuits // *Automation and Remote Control*, vol. 64, No 1, pp. 153–161, 2003 (in Russian).
 16. Sen S.K. A Self-Checking Circuit for Concurrent Checking by 1-out-of-4 code with Design Optimization using Constraint Don't Cares // *National Conference on Emerging trends and advances in Electrical Engineering and Renewable Energy (NCEEERE 2010)*, Sikkim Manipal Institute of Technology, Sikkim, held during 22–24 December, 2010.
 17. Das D.K., Roy S.S., Dmitriev A., Morozov A., Gössel M. Constraint Don't Cares for Optimizing Designs for Concurrent Checking by 1-out-of-3 Codes // *Proceedings of the 10th International Workshops on Boolean Problems*, Freiberg, Germany, September, 2012, pp. 33–40.
 18. Pivovarov D.V. Formation of Concurrent Error Detection Systems in Multiple-Output Combinational Circuits Using the Boolean Complement Method Based on Constant-Weight Codes // *Transport Automation - 2018*. – Vol. 4. – No 1. – pp. 131–149 (in Russian).
 19. Morozov M., Saposhnikov V.V., Saposhnikov V.V., Goessel M. New Self-Checking Circuits by Use of Berger-codes // *Proceedings of 6th IEEE International On-Line Testing Workshop*, Palma De Mallorca, Spain, 3–5 July 2000, pp. 171–176.
 20. Efanov D.V., Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I. The Self-Checking Concurrent Error-Detection Systems Synthesis Based on the Boolean Complement to the Bose-Lin Codes with the Modulo Value $M=4$ // *Electronic Modeling*. – 2021. – Vol. 43. – Issue 1. – Pp. 28–45. DOI: 10.15407/emodel.43.01.028.
 21. Efanov D.V., Zueva M.V. Hsiao Codes Properties in Discrete Devices Technical Diagnostics Systems // *Programmnaya Ingeneria*, 2023, vol. 14, No 7, pp. 339–349. DOI: 10.17587/prin.14.339-349 (in Russian).
 22. Saposhnikov V.I., Dmitriev A., Goessel M., Saposhnikov V.I. Self-Dual Parity Checking – a New Method for on Line Testing // *Proceedings of 14th IEEE VLSI Test Symposium*, USA, Princeton, 1996, pp. 162–168.
 23. Gessel M., Dmitriev A.V., Sapozhnikov V.I., Sapozhnikov V.V. Fault detection in combinational circuits using self-dual control // *Automation and telemechanics*, 2000, No 7, pp. 140–149 (in Russian).
 24. Efanov D., Sapozhnikov V., Sapozhnikov V.I., Osadchy G., Pivovarov D. Self-Dual Complement Method up to Constant-Weight Codes for Arrangement of Combinational Logical Circuits Concurrent Error-Detection Systems // *Proceedings of 17th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2019)*, Batumi, Georgia, September 13–16, 2019, pp. 136–143. doi: 10.1109/EWDTS.2019.8884398.
 25. Efanov D.V., Pivovarov D.V. The Hybrid Structure of a Self-Dual Built-In Control Circuit for Combinational Devices with Pre-Compression of Signals and Checking of Calculations by Two Diagnostic Parameters // *Proceedings of 19th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2021)*, Batumi, Georgia, September 10–13, 2021, pp. 200–206. doi: 10.1109/EWDTS52692.2021.9581019.
 26. Pashukov A.V. Application of weight-based sum codes at the synthesis of circuits for built-in control by Boolean complement method // *Automation in transport*. – 2022. – Vol. 8. – No 1. – pp. 101–114. DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-01-101-114 (in Russian).
 27. Efanov D.V., Yelina Y.I. Study of algorithms for synthesis of self-checking digital devices based on Boolean correction of signals using weighted Bose-Lin codes // *Automation in transport*. – 2024. – Vol. 10. – No 1. – pp. 74–99. DOI: 10.20296/2412-9186-2024-10-01-74-99. (in Russian).
 28. Efanov D.V. The Synthesis of Self-Checking Combinational Devices on the Basis of Codes with the Effective Symmetrical Error Detection // *Information technology*. – 2023. – Vol. 29. – No 10. – pp. 503–511. DOI: 10.17587/it.29.503-511. (in Russian).
 29. Efanov D.V., Yelina Y.I. Synthesis of Concurrent Error-Detection Circuits Based on Boolean Signals Correction Using Modular Weight-Based Sum Codes // *Proceedings of the 2024 Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EICon)*, 29–30 January 2024, St. Petersburg, Russia, pp. 350–355. doi: 10.1109/EICon61730.2024.10468328.
 30. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I., Efanov D.V. Hamming codes in concurrent error detection systems of logic devices / *Monograph*. – St. Petersburg: Nauka, 2018, 151 p. (in Russian).