

ОРГАНИЗАЦИЯ КОНТРОЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЙ НА ВЫХОДАХ САМОДВОЙСТВЕННЫХ ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЦИКЛИЧЕСКИХ ИЗБЫТОЧНЫХ КОДОВ

Д.В. Ефанов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29
E-mail: TrES-4b@yandex.ru

Д.В. Пивоваров

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I
Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9
E-mail: pivovarov.d.v.spb@gmail.com

Ключевые слова: самодвойственные цифровые устройства; контроль вычислений; схема встроенного контроля; схема сжатия; циклический избыточный код; контроль самодвойственности.

Аннотация: Предложено при организации контроля вычислений на выходах самодвойственных цифровых устройств использовать особенности циклических избыточных кодов. Эффективным является сочетание свойств обнаружения ошибок циклическими избыточными кодами в информационных символах, а также выбор таких образующих полиномов, которые дают возможность построения циклических избыточных кодов, проверочные символы которых описываются самодвойственными булевыми функциями. Установлены значения числа информационных символов в циклических избыточных кодах для каждого образующего полинома со свободным членом, для которого кодер будет представлять собой самодвойственное цифровое устройство. Представлены алгоритмы синтеза самопроверяемых самодвойственных цифровых устройств.

1. Введение

При реализации современных систем управления применяются разнообразные методы обеспечения надежности и безопасности функционирования их компонентов [1]. Для определения неисправных узлов в процессе выполнения устройствами своих функций используются специализированные схемы встроенного контроля (СВК) [2]. СВК позволяют контролировать проявления неисправностей косвенно по результатам вычислений на рабочих выходах (или в дополнительных контрольных точках) по заранее установленным диагностическим признакам, в качестве которых выступают, например, принадлежность формируемых функций заранее установленным классам булевых функций или же принадлежность кодовых слов, символы которых формируются в СВК сигналами от рабочих выходов диагностирования и контрольными устройствами, заранее выбранным двоичным избыточным кодам [3].

Исследования авторов настоящей статьи позволили установить, что известные циклические избыточные коды [4], могут эффективно применяться при синтезе СВК не

только при контроле диагностического признака принадлежности формируемых кодовых слов заранее выбранному коду, но и при контроле свойства самодвойственности вычисляемых функций [5]. При этом целесообразно учитывать характеристики обнаружения ошибок циклическими избыточными кодами в информационных символах, установленные в [6, 7]. Рассмотрим подробнее особенности организации СВК для самодвойственных цифровых устройств с применением циклических избыточных кодов.

2. Структуры и алгоритмы синтеза СВК с контролем вычислений по признаку самодвойственности функций на основе циклических избыточных кодов

На рис. 1 приводится структурная схема организации СВК с использованием циклического избыточного кода $PN(m, k)$, где N – десятичный эквивалент, двоичный аналог которого соответствует образуемому полиному, m и k – число информационных и проверочных символов соответственно.

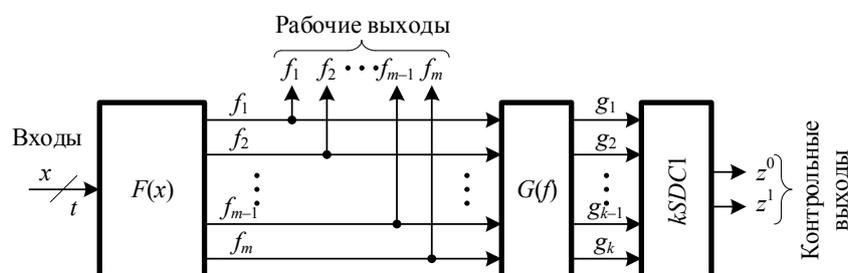


Рис. 1. Структура организации СВК со сжатием сигналов от полного множества выходов объекта диагностирования с использованием кодеров $PN(m, k)$ -кодов.

Представленная структурная схема подразумевает контроль вычислений с использованием специализированной схемы сжатия сигналов от объекта диагностирования $F(x)$ с помощью кодера $G(f)$ выбранного $PN(m, k)$ -кода. Сам объект диагностирования должен обладать свойством самодвойственности структуры, другими словами, на его выходах должны формироваться самодвойственные булевы функции. Если изначально объект диагностирования самодвойственным не является, то его структура преобразуется в самодвойственную с использованием известных принципов [8]. Здесь необходимо уточнить, что существуют способы контроля вычислений по признаку самодвойственности вычисляемых функций и для несамодвойственных цифровых устройств, которые подразумевают коррекцию сигналов с их рабочих выходов в СВК в самодвойственные булевы функции [9]. Однако в данной работе внимание исследователей и читателя сфокусировано на использовании контроля вычислений со сжатием сигналов с применением кодеров циклических избыточных кодов.

Структура СВК, приведенная на рис. 1, состоит полностью из типовых элементов – кодера $PN(m, k)$ -кода и модуля $kSDC1$, включающего в себя k стандартных тестеров самодвойственных сигналов SDC [10] и один $k-1$ модуль сжатия парафазных сигналов TRC [11].

При синтезе СВК, изображенной на рис. 1, важным является выбор циклического избыточного кода с учетом того, какими характеристиками обнаружения ошибок он должен обладать, поскольку на входах кодера не должно происходить маскировки

ошибок. Одним из способов построения полностью самопроверяемой СВК является способ, подразумевающий действия по следующему алгоритму.

Алгоритм 1. Правила синтеза СВК для самодвойственного устройства на основе $PN(m, k)$ -кода:

1. Моделируется работа устройства с учетом выбранной модели неисправности и допустимого множества входных комбинаций и фиксируются виды и кратности возникающих на его выходах ошибок, для которых образуется множество W .

2. Определяется подмножество $W' \subset W$ ошибок, для которых при подаче на входы объекта диагностирования инверсных комбинаций удовлетворяется условие:

$$\forall i \in \{0, 1, \dots, 2^{n-1} - 1\}: \bigotimes_{i=1}^m (A_i^j \oplus B_{2^{n-1}-i}^j) \neq 0,$$

где A_i^j и $B_{2^{n-1}-i}^j$ – значения j -ой функции, формируемой на j -ом выходе объекта диагностирования, при поступлении входной комбинации, соответствующей десятичному эквиваленту i и $2^n - 1 - i$.

3. С учетом подмножества W' и свойств циклических избыточных кодов осуществляется выбор конкретного образующего полинома для построения $PN(m, k)$ -кода, обнаруживающего данного вида ошибки и имеющего самодвойственный кодер (условия самодвойственности кодера линейного кода указано в [10]).

4. Синтезируется СВК по структуре рис. 1.

Представленный алгоритм дает возможность построения полностью самопроверяемых СВК для любых структур объектов диагностирования. Но при малых значениях k могут появляться ошибки с высокой кратностью, которые не обнаруживает $PN(m, k)$ -код, что потребует увеличения числа проверочных символов для полного покрытия неисправностей объекта диагностирования. Кроме того, не для любого числа m существует $PN(m, k)$ -код, проверочные символы которого описываются самодвойственными функциями.

Эффективной может оказаться организация контроля вычислений по специально выбранным группам выходов.

Алгоритм 2. Правила синтеза СВК для самодвойственного устройства на основе $PN(m, k)$ -кода с контролем вычислений по группам выходов:

1. Моделируется работа устройства с учетом выбранной модели неисправности и допустимого множества входных комбинаций и фиксируются виды и кратности возникающих на его выходах ошибок, для которых образуется множество W .

2. Определяются p подмножеств V_i , $i \in \{1, 2, \dots, p\}$, выходов объекта диагностирования с мощностями m_1, m_2, \dots, m_p , ошибки из множества W в которых обнаруживаются с помощью кодов $PN(m_1, k_1), PN(m_2, k_2), \dots, PN(m_p, k_p)$.

3. Решается задача покрытия множества V выходов объекта диагностирования q подмножествами V_i , $i \in \{1, 2, \dots, p\}$, с учетом условия $V_1 \cup V_2 \cup \dots \cup V_q = V$, $q \in \{1, 2, \dots, p\}$. Таким образом, выбирается q подмножеств V_i , покрывающих все выходы объекта диагностирования.

4. Для каждого полученного на предыдущем шаге подмножества V_i синтезируется отдельная СВК.

5. Выходы q СВК объединяются на входах самопроверяемого компаратора, реализуемого на основе $q-1$ модулей TRC .

Авторами исследования разработан простой способ получения функций, описывающих проверочные символы циклических избыточных кодов, а также установлены значения m для различных образующих полиномов, при использовании которых кодер циклического избыточного кода окажется самодвойственным цифровым

устройством. Для $PN(m, k)$ –кодов с числом проверочных символов $k \in \{1, 2, 3, 4\}$ в таблице приведены значения числа информационных символов, при которых выполняется данное условие. Отметим, что в таблице указаны только нечетные значения N , так как для четных значений N циклический избыточный код не обнаруживает существенно большее количество ошибок, а также формируются не все контрольные векторы для $PN(m, k)$ –кода, что усложняет процесс синтеза полностью самопроверяемых кодеров данных кодов.

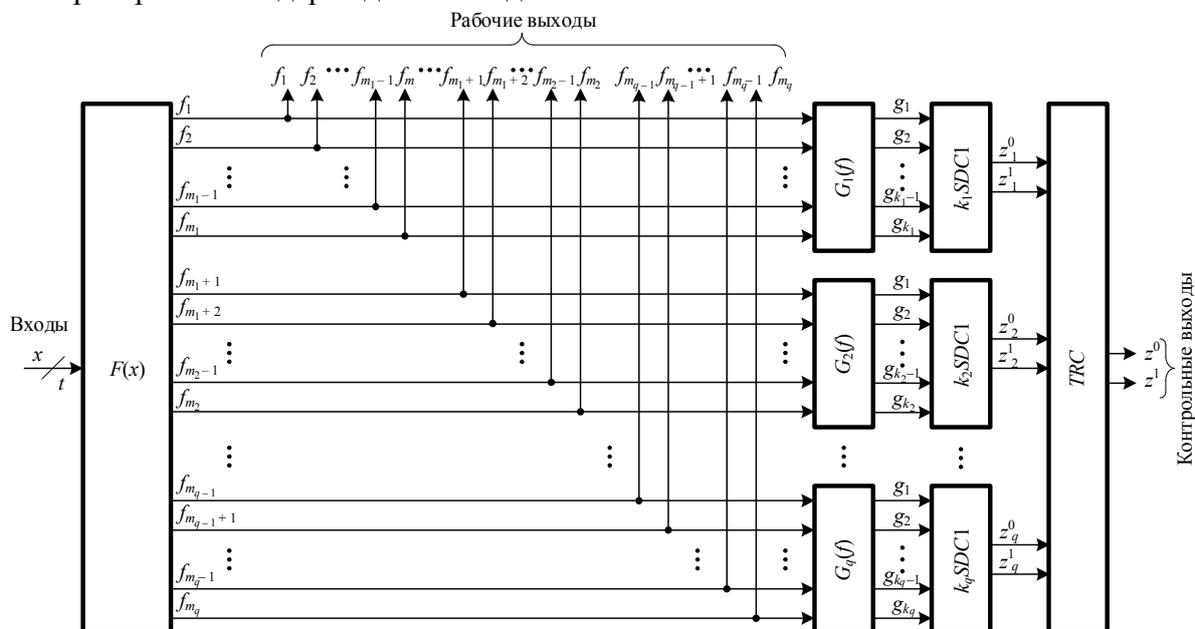


Рис. 2. Структура организации СВК со сжатием сигналов от групп выходов объекта диагностирования с использованием кодеров $PN(m, k)$ –кодов.

Значения числа информационных символов для $PN(m, k)$ –кодов с самодвойственными функциями, описывающими проверочные символы.

k	N	m
1	3	$1+2i$
2	5	$2+4i$
	7	$2+3i$
3	9	$3+6i$
	11	$2+7i$
	13	$6+7i$
	15	–
4	17	$4+8i$
	19	$3+15i$
	21	–
	23	$2+14i$
	25	$8+15i$
	27	$4+12i$
	29	$6+14i$
	31	$4+5i$

Примечание. Число $i \in \mathbb{N}_0$.

3. Заключение

Зная особенности обнаружения ошибок $PN(m, k)$ –кодами в информационных символах, а также значения m , при которых проверочные символы для данного N будут описываться самодвойственными булевыми функциями, можно осуществить выбор кода для синтеза самопроверяемого устройства со схемой сжатия по структурам, приведенным на рис. 1 и 2. Использование циклического избыточного кода позволяет сократить число наблюдаемых выходов, соответственно, и упростить СВК без потери в обнаруживающих характеристиках.

Дальнейшие исследования авторов будут направлены на изучение особенностей применения свойств циклических избыточных кодов и для других структур организации СВК. Важным направлением является моделирование цифровых схем с СВК и установление особенностей обеспечения функционирования самодвойственных структур в импульсном режиме работы, а также тестирование разрабатываемых методов технической диагностики на большом числе контрольных схем [12].

В заключение отметим, что учет сразу же нескольких свойств циклических избыточных кодов, на взгляд авторов, является перспективным подходом к синтезу самопроверяемых цифровых устройств и систем, расширяющим поле выбора способа организации контроля вычислений.

Список литературы

1. Дрозд А.В., Харченко В.С., Антошук С.Г., Дрозд Ю.В., Дрозд М.А., Сулима Ю.Ю. Рабочее диагностирование безопасных информационно-управляющих систем / Под ред. А.В. Дрозда и В.С. Харченко. Харьков: Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», 2012, 614 с.
2. Согомонян Е.С., Слабаков Е.В. Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы. М.: Радио и связь, 1989, 208 с.
3. Göessel M., Ocheretny V., Sogomonyan E., Marienfeld D. New Methods of Concurrent Checking. Dordrecht: Springer Science+Business Media B.V., 2008. 184 p.
4. Сагалович Ю.Л. Введение в алгебраические коды / 2-е изд., перераб. и доп. М.: ИППИ РАН, 2010. 302 с.
5. Шалыто А.А. Модули, универсальные в классе самодвойственных функций и в «близких» к ним классах // Известия Академии наук. Теория и системы управления. 2001. № 5. С. 110-120.
6. Абдуллаев Р.Б. Свойства полиномиальных кодов в системах функционального контроля комбинационных логических схем // Автоматика на транспорте. 2018. Т. 4, № 4. С. 655-686.
7. Abdullaev R., Efanov D. Polynomial Codes Properties Application in Concurrent Error-Detection Systems of Combinational Logic Devices // Proceedings of 19th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2021), Batumi, Georgia, September 10-13, 2021, pp. 40-46, doi: 10.1109/EWDTS52692.2021.9580992.
8. Гессель М., Мошанин В.И., Сапожников В.В., Сапожников Вл.В. Обнаружение неисправностей в самопроверяемых комбинационных схемах с использованием свойств самодвойственных функций // Автоматика и телемеханика. 1997. № 12. С. 193-200.
9. Гессель М., Дмитриев А.В., Сапожников В.В., Сапожников Вл.В. Самотестируемая структура для функционального обнаружения отказов в комбинационных схемах // Автоматика и телемеханика. 1999. № 11. С. 162-174.
10. Ефанов Д.В., Погодина Т.С. Исследование свойств самодвойственных комбинационных устройств с контролем вычислений на основе кодов Хэмминга // Информатика и автоматизация. 2023. Т. 22, № 2. С. 349-392. DOI: 10.15622/ia.22.2.5.
11. Lala P.K. Self-Checking and Fault-Tolerant Digital Design. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 2001, 216 p.
12. Sentovich E.M., Singh K.J., Moon C., Savoj H., Brayton R.K., Sangiovanni-Vincentelli A. Sequential Circuit Design Using Synthesis and Optimization // Proceedings IEEE International Conference on Computer Design: VLSI in Computers & Processors, 11-14 October 1992, Cambridge, MA, USA. P. 328-333. doi: 10.1109/ICCD.1992.276282.