

На правах рукописи



АБДУЛЛАЕВ Руслан Борисович

**ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛИНОМИАЛЬНЫХ КОДОВ ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ
СИСТЕМ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ УСТРОЙСТВ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ**

Специальность 05.13.06 – «Автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами (транспорт)»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» на кафедре «Автоматика и телемеханика на железных дорогах».

Научный руководитель *Ефанов Дмитрий Викторович,*
доктор технических наук, доцент,

Официальные оппоненты *Матросова Анжела Юрьевна,*
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры компьютерной безопасности
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский
Томский государственный университет», г. Томск

Никищенко Сергей Алексеевич,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры
«Управление эксплуатационной работой»
ФГБОУ ВО «Самарского государственного
университета путей сообщения», г. Самара

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Ростовский государственный университет путей
сообщения»

Защита состоится «17» июня 2021 г. в 13 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 218.008.02 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» по адресу: 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 9, ауд.7-320.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке университета и на сайте ФГБОУ ВО ПГУПС (www.pgups.ru), на сайте Минобрнауки России (www.vak.minobrnauki.gov.ru).

Отзывы на автореферат, заверенные печатью организации (в двух экземплярах), просим направлять в адрес Ученого совета университета. Автореферат разослан «16» апреля 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
канд. техн. наук, доцент



Константин Евгеньевич Ковалев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертационного исследования. С совершенствованием микроэлектронной и микропроцессорной техники возрастают потребности в развитии методов их тестового и функционального диагностирования. В настоящее время основные тенденции в развитии техники и технологий направлены на миниатюризацию компонентов и повышение их производительности, что связано с уменьшением пороговых значений срабатывания элементов, повышением чувствительности элементов к электромагнитным воздействиям и т.д.

При построении современных систем управления ответственными технологическими процессами, в т.ч. систем управления движением поездов, используют различные методы обеспечения надежности, в том числе рабочее диагностирование узлов и компонентов системы. Напольные узлы автоматики железнодорожной отрасли требуют проведения периодического обслуживания и технической диагностики для поддержания надлежащего уровня надежности.

Указанные обстоятельства влекут за собой необходимость адаптации существующих и развития новых методов технического диагностирования.

Диссертационное исследование посвящено развитию методов синтеза систем функционального контроля логических устройств автоматики и вычислительной техники с применением помехозащищенных и помехоустойчивых кодов, и в частности, с использованием свойств полиномиальных кодов для решения указанных задач.

Степень разработанности темы исследования. Одними из первых работ в области технической диагностики были работы ученых лаборатории технической диагностики и отказоустойчивости Института автоматики и телемеханики (ныне Института проблем управления РАН) под руководством П. П. Пархоменко. Большой вклад в совершенствование методов и алгоритмов технической диагностики внесли такие ученые постсоветского пространства как Г. П. Аксенова, Д. В. Гаскаров, А. В. Дрозд, А. Д. Закревский, М. Ф. Каравай, И. С. Левин, А. Ю. Матросова, А. В. Мозгалеvский, П. П. Пархоменко, Вал. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Е. В. Слабаков, Е. С. Согомонян, Н. С. Щербаков, В. И. Хаханов и многие другие. Из зарубежных ученых в области диагностики известны такие ученые как В. Becker, М. Gössel, R. E. Fujiwara, E. J. McCluskey, R. Bennets, J. Roth, F. F. Sellers, N. A. Toubа, J. F. Wakerly, Y. Zorian и др.

Наиболее близкими вопросами, связанными с настоящим исследованием занимались Д. В. Ефанов, А. А. Блюдов, В. В. Дмитриев, Д. А. Никитин, Д. В. Пивоваров.

Тема диссертации соответствует паспорту специальности 05.13.06 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (транспорт)» по пунктам 13 и 14.

Цели и задачи диссертационного исследования. Основной целью диссертационного исследования является совершенствование методов синтеза систем функционального контроля устройств и систем автоматики на основе полиномиальных кодов и их свойств. Для достижения поставленных выше целей решаются следующие задачи:

1. Исследование особенностей обнаружения ошибок в информационных векторах полиномиальными кодами, а также выделение особых классов полиномиальных кодов, применение которых целесообразно при синтезе систем функционального контроля.

2. Исследование вероятностных характеристик полиномиальных кодов в системах функционального контроля.

3. Разработка способов синтеза систем функционального контроля с обнаружением любых неисправностей из определенных классов на выходах устройств автоматики с применением полиномиальных кодов.

4. Практическое использование установленных в работе свойств полиномиальных кодов при построении систем мониторинга устройств железнодорожной автоматики и телемеханики.

Объектом исследования является система функционального контроля логических устройств автоматики, строящаяся на основе помехозащищенных кодов, а **предметом** – характеристики обнаружения ошибок полиномиальными кодами, а также особенности анализа и синтеза структур диагностируемых логических схем для выявления особенностей распределения ошибок на их выходах.

Научная новизна диссертации заключается в следующих научных результатах:

1. Разработан универсальный способ расчета числа необнаруживаемых ошибок полиномиальными кодами, построенных с помощью любых образующих полиномов.

2. Выявлены новые свойства полиномиальных кодов по обнаружению ошибок конкретных видов и кратностей, а также установлены особые классы

полиномиальных кодов, применение которых может оказаться эффективным при организации диагностического обеспечения устройств и систем автоматики.

3. Образующие полиномы для получения кодов с определенными свойствами классифицированы и выделены те типы полиномов, которые позволяют строить коды с наилучшими характеристиками обнаружения ошибок для задач функционального контроля устройств автоматики.

4. Определены вероятностные характеристики обнаружения ошибок в информационных разрядах по видам и кратностям полиномиальными кодами.

5. Предложены способы построения систем функционального контроля логических устройств автоматики комбинационного типа с обнаружением любых неисправностей из заданного класса на основе полиномиальных кодов.

6. Предложен способ логической обработки диагностических данных на основе выделения их значимых диапазонов и кодирования с помощью полиномиальных кодов.

Теоретическая значимость работы заключается в получении способа расчета числа необнаруживаемых ошибок любых полиномиальных кодов, получении ранее неизвестных свойств обнаружения ошибок полиномиальными кодами различных видов и кратностей в информационных разрядах; разработке способов построения систем функционального контроля на основе полиномиальных кодов с обнаружением любых неисправностей из заданного класса.

Практическая значимость работы заключается в возможности применения ее результатов для построения систем функционального контроля с уменьшенной сложностью технической реализации, чем при полном дублировании и многократном резервировании. Кроме того, установленные свойства полиномиальных кодов могут быть учтены при проектировании вычислительных систем и систем передачи данных.

Методология и методы исследования. Использованы методы математического анализа, булевой алгебры, теории дискретных устройств, теории технической диагностики дискретных систем, теории вероятностей и теории алгоритмов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Способ расчета числа необнаруживаемых ошибок полиномиальными кодами.

2. Установленные характеристики обнаружения ошибок полиномиальными кодами различных видов и кратностей.

3. Классификация полиномов по свойствам обнаружения ошибок различных видов и кратностей в информационных разрядах кодовых слов.

4. Вероятностные характеристики обнаружения монотонных, симметричных и асимметричных ошибок в информационных разрядах полиномиальных кодовых слов.

5. Способы построения систем функционального контроля логических устройств автоматики комбинационного типа с обнаружением любых неисправностей из заданного класса на основе полиномиальных кодов.

6. Метод повышения эффективности обработки данных в системах технического диагностирования и мониторинга устройств ЖАТ.

Степень достоверности результатов исследования подтверждается точными вычислениями с использованием аппарата математического анализа, булевой алгебры, теории дискретных устройств и технической диагностики, а также совпадением теоретических результатов с экспериментальными.

Апробация результатов. Результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на 5 международных, на 2 республиканских конференциях и на 3 научно-практических семинарах.

В числе конференций, где докладывались работы автора диссертации, имеются международная конференция «IEEE East-West Design & Test Symposium» (г. Казань, Россия, 2018 г.), международная конференция «Новые информационные технологии в исследовании сложных структур» (г. Томск, Россия, 2018 г.), республиканская научно-техническая конференция с участием зарубежных ученых «Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте» (г. Ташкент, Узбекистан, 2018-2020 гг.), международная конференция «IEEE East-West Design & Test Symposium» (г. Батуми, Грузия, 2019 г.), международная научно-практическая конференция «Проблемы безопасности на транспорте» (г. Гомель, Беларусь, 2019-2020 гг.).

Результаты исследований обсуждались на семинарах «Автоматика и дискретная математика» в 2017-2018 гг., а также на заседаниях кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I в период 2018 – 2021 гг.

По результатам диссертационного исследования опубликованы 15 работ в научных журналах и сборниках материалов международных и республиканских научно-практических конференций, из них 7 публикаций в

изданиях, включенных в Перечень изданий ВАК РФ, и 2 публикации, индексируемые в международной базе цитируемости SCOPUS.

Основные научные и практические результаты диссертационного исследования использованы при функциональном контроле узлов объектных контроллеров мониторинга и обработки диагностической информации в комплексных решениях по мониторингу технического состояния и параметров объектов автодорожной и железнодорожной инфраструктуры, а также в учебном процессе на кафедре «Автоматика и телемеханика» Ташкентского государственного транспортного университета.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Работа содержит 177 страниц машинописного текста, 63 рисунка, 13 таблиц. Библиографический список включает 157 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационного исследования, сформулированы цель и задачи исследования.

В первой главе рассматриваются методы обеспечения надежности, отказоустойчивости и обеспечения безопасности систем автоматики на транспорте. Отмечена роль и проанализировано современное состояние систем функционального контроля (СФК) устройств в железнодорожной автоматике. Дан обзор существующих методов синтеза СФК на основе помехозащищенных кодов и перечислены их недостатки.

Во второй главе приведены результаты исследований полиномиальных кодов для задач функционального контроля логических устройств.

При функционировании блока $F(x)$ (см. рис. 1) на его выходах, в результате внутренних неисправностей, возникают ошибки. Для их обнаружения в СФК на основе помехозащищенного кода используется контрольная схема $G(x)$, генератор кода $G(f)$ и самопроверяемая схема сравнения TRC .

Обнаружение ошибок на выходах диагностируемого устройства СФК на основе помехозащищенного кода определяется обнаруживающими свойствами кода. Число необнаруживаемых ошибок любых кодов зависит от числа контрольных групп по которым распределены информационные векторы кода. Назовем такие контрольные группы как **рабочими контрольными группами** кода.

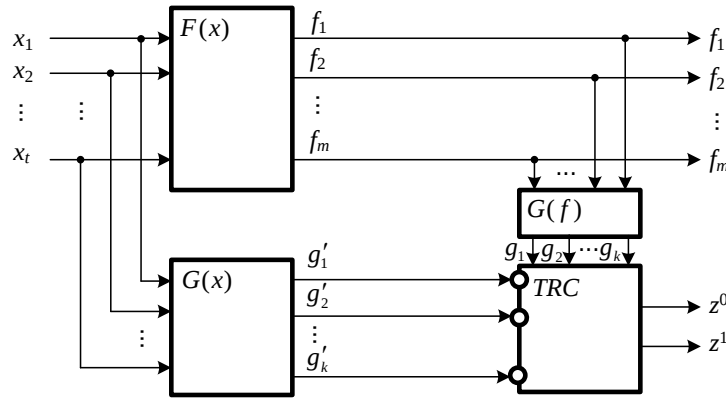


Рисунок 1. Структурная схема СФК на основе помехозащищенного кода

В исследуемых кодах число таких групп $N_k^{P(x)}$ (где k – длина контрольного вектора) зависит от используемого в построении кода образующего полинома $P(x)$ и равно числу различного вида остатков $N_{R(x)}$ (где $R(x)$ – остаток от деления), образующихся при делении информационного вектора $M(x)$, смещенного на степень $x^{\deg P}$, (где $\deg M = m-1$; m – длина информационного вектора), на полином $P(x)$:

$$x^{\deg P} M(x) / P(x) = Q(x) + R(x),$$

где $Q(x)$ – частное от операции деления.

В ходе исследований выявлена закономерность получения числа различного вида остатков от вида используемого образующего полинома:

$$N_{R(x)} = N_k^{P(x)} = 2^{j-l}, \quad (1)$$

где $j = \deg P$; l – степень наименьшего члена $P(x)$.

Используя выражение (1) доказаны следующие утверждения:

Лемма 1. При использовании в построении кода полиномов вида $x^j + x^{j-1}$, $\forall j$, число рабочих контрольных групп равно 2.

Лемма 2. При использовании в построении кода полиномов $P(x)$ со значением $l=0$, $j>l$, число рабочих контрольных групп принимает максимально возможное значение при заданном k .

С помощью (1) получена формула подсчета общего числа необнаруживаемых ошибок полиномиальным кодом при использовании любых полиномов $P(x)$:

$$N_{(m,k)}^{P(x)} = 2^m (2^{m-k+l} - 1). \quad (2)$$

Используя формулу (2) в диссертации доказаны:

Теорема 1. Код, построенный с помощью образующего полинома вида x^j , $\forall j$, не является помехоустойчивым кодом.

Теорема 2. Код, построенный с помощью полинома $P(x)$ со значением $l=0$, $j>l$, является **оптимальным** кодом по критерию минимума числа необнаруживаемых ошибок.

Теорема 3. Любой полином $P(x)$, со значением $l=0$, $\deg P>1$ и с четным количеством членов, порождает **оптимальный код с проверкой на четность** по критерию полного обнаружения всех ошибок нечетных кратностей и некоторой доли четных кратностей.

Лемма 3. Доля необнаруживаемых ошибок при любых полиномах $P(x)$ со значением $l=0$, $j>l$, для заданного значения j является постоянной величиной.

Далее, в разделе 2 установлены ранее неизвестные свойства и некоторые условия построения полиномиальных кодов с заданными характеристиками. Приведем основные из них.

Свойство 1. Любой неприводимый примитивный полином $P'(x)$ при $m \leq 2^k - 1$ формирует код с обнаружением любых ошибок $d \leq 2$.

Такие же условия определены для трехкратных ошибок и установлено следующее.

Свойство 2. Полиномиальный код, построенный с условием $m \leq 2^{k-1} - j$ и с помощью образующего полинома вида:

$$P(x) = P'(x)(x^j + 1), \quad (3)$$

обнаруживает любые ошибки $d < 4$, а также любые ошибки $d > 4$.

Свойство 3. Полиномиальный код обнаруживает любые ошибки $d < m$ если образующий полином с числом членов $W^{P(x)} = j + 1$ имеет вид:

$$P(x) = x^j + x^{j-1} + x^{j-2} + x^{j-3} + \dots + x^1 + x^0, \quad (4)$$

где $\deg P = m - 1$.

Свойство 4. Полиномиальный код обнаруживает любые симметричные ошибки если образующий полином состоит из нечетного числа членов и имеет вид:

$$P(x) = x^j + x^{j-i} + \dots + x^0, \quad (5)$$

где $\deg P = m - 1$; $i \in \{1, 2, 3, \dots\}$; $i < j$.

Свойство 5. Полиномиальный код полностью обнаруживает любые асимметричные ошибки если образующий полином имеет вид:

$$P(x) = x^j + 1, \quad (6)$$

где $\deg P = m - 1$.

Все установленные свойства были подтверждены в ходе экспериментов с контрольными комбинационными схемами из набора LGSynth'89.

На основе существующих и выявленных свойств полиномиальных кодов в диссертации приведена классификация полиномов, рекомендуемых для применения при построении кода для дальнейшего использования при функциональном контроле устройств автоматики. В диссертации приводится способ построения СФК логических комбинационных схем на основе полиномиальных кодов.

В разделе также проведены исследования обнаруживающих характеристик полиномиальных кодов по сравнению с характеристиками кодов, широко используемых в СФК – коды Боуза-Лина. По графикам рис. 2 и 3 можно заметить, что характеристики кодов построенных с помощью полиномов со свободным членом намного лучше обнаруживающих характеристик модульных кодов суммирования, особенно при обнаружении ошибок малых кратностей.

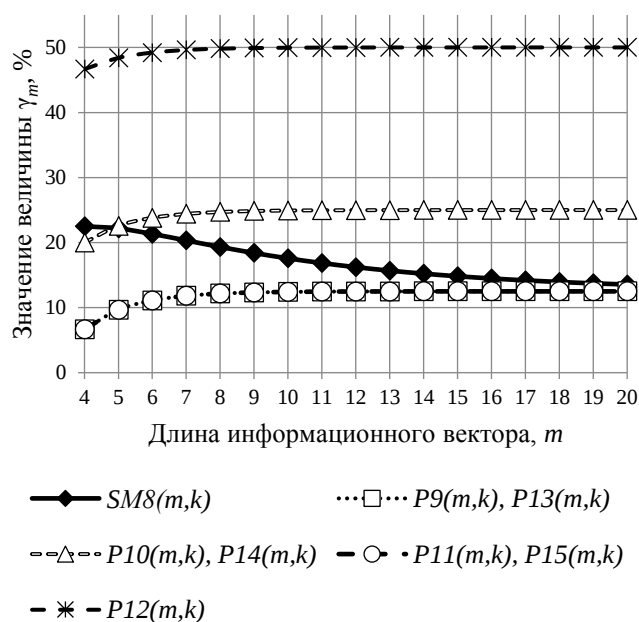


Рисунок 2. Доля необнаруженных ошибок полиномиальными кодами 3 класса и кодом SM8

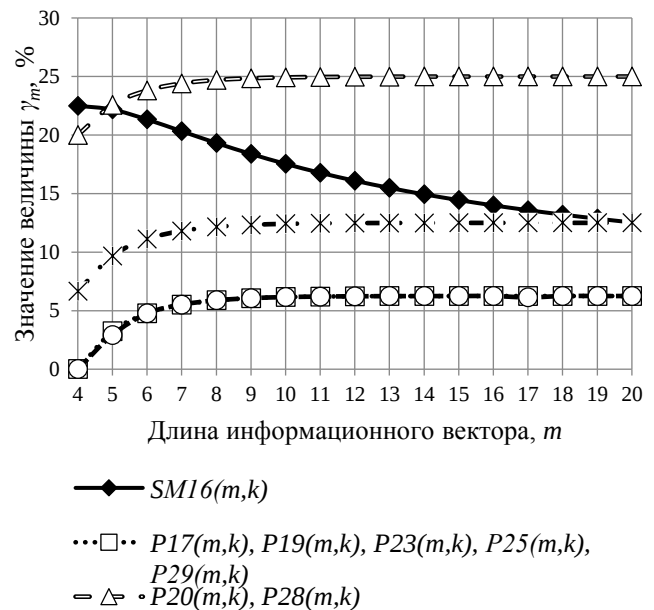


Рисунок 3. Доля необнаруженных ошибок полиномиальными кодами 4 класса и кодом SM16

Особый интерес представляет оценка аппаратных затрат на реализацию СФК на основе полиномиальных кодов. В связи с этим определена оценка сложности технической реализации систем на основе полиномиальных кодов, по значениям которых, установлено, что для тестовых схем из библиотек LGSynth'93 и MCNC показатели сложности устройств с СФК на основе

полиномиальных кодов по отношению к методу дублирования не превышают в среднем 80%, а при сравнении с методом использования модульных кодов суммирования – 70%. Даже при значении контрольного вектора $k=m-1$ полиномиальных кодов, показатель аппаратных затрат СФК по сравнению с методом дублирования не превышает в среднем 90%.

В третьем разделе исследуются вероятностные характеристики полиномиальных кодов.

При функционировании диагностируемого устройства $F(x)$ на его выходах могут возникать ошибки и если не учитывать специфику контролируемого устройства, а допустить, что появление рабочих векторов на выходах устройства равновероятно; появление ошибки кратностью d на выходах устройства – независимое событие; то вероятность возникновения необнаруживаемой ошибки кратностью d при длине информационного вектора m рассчитывается по формуле:

$$Q_{m,d} = \beta_{m,d} C_m^d p^{m-d} (1-p)^d, \quad (7)$$

где $(1-p)^d$ – вероятность одновременного искажения d разрядов; p^{m-d} – вероятность отсутствия искажения на $m-d$ выходах; сомножитель $\beta_{m,d}$ – доли необнаруживаемых ошибок кратностью d от общего числа ошибок той же кратности; сомножитель C_m^d – число вариантов искажений кратностью d при заданном значении m .

Для определения значения вероятности необнаруживаемой ошибки Q_m конкретным полиномиальным кодом суммируются все значения $Q_{m,d}$, при отношении d к множеству $d \in \{1, 2, 3, \dots, m\}$:

$$Q_m = \sum_{d \in \{1, 2, 3, \dots, m\}} Q_{m,d}. \quad (8)$$

На рис. 4 и 5 приведены основные показатели вероятностей необнаруживаемых ошибок для оптимальных кодов младших классов.

Поведение кривой вероятностных характеристик кодов на рис. 5 при использовании полинома $P11$ ($P13$) объясняется тем, что данными кодами обнаруживаются все двукратные ошибки до значения $m \leq 7$, доля возникновения которых наибольшая среди остальных кратностей ошибок. Использование таких кодов позволяет строить системы с низкими общими показателями вероятности возникновения ошибок, т.к. при реальных схемах ошибки малых кратностей возникают чаще, чем остальные.

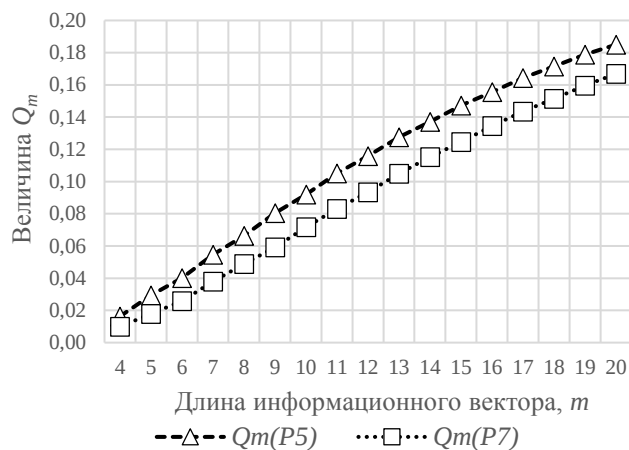


Рисунок 4. Вероятности необнаруживаемой ошибки оптимальных полиномиальных кодов 2 класса при $p=0,9$

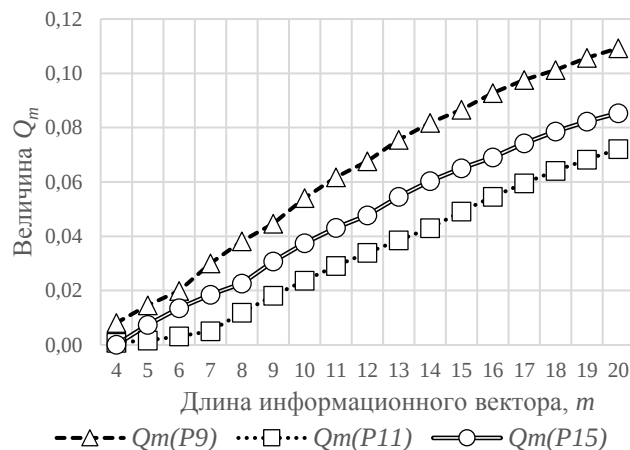


Рисунок 5. Вероятности необнаруживаемой ошибки оптимальных полиномиальных кодов 3 класса при $p=0,9$

Структуры комбинационных схем определяют, фактически, и виды ошибок на их выходах. Учитывая это, были исследованы вероятностные характеристики необнаружения полиномиальными кодами различных видов ошибок.

На основе проведенных исследований по вероятностным характеристикам полиномиальных кодов отметим некоторые особые моменты:

- общие показатели вероятностных характеристик полиномиальных кодов при всей длине информационного вектора лучше у кодов, обнаруживающих большую долю симметричных ошибок;
- применение в основе кода полиномов, при которых хорошо обнаруживаются симметричные ошибки, улучшает не только показатели вероятности обнаружения симметричных ошибок, но также и монотонных;
- увеличение значения k на $k+1$ заданного класса кодов позволяет вдвое улучшить показатели вероятности обнаружения асимметричных ошибок в информационных векторах.

В четвертом разделе диссертации исследуются методы синтеза СФК с полным обнаружением ошибок на выходах устройств с учетом свойств полиномиальных кодов.

Предложены два способа синтеза систем с полной идентификацией внутренних неисправностей диагностируемого устройства. В данном разделе рассматривалась модель одиночных константных неисправностей.

1. Метод построения системы функционального контроля на основе подбора образующего полинома.

В практических реализациях часть ошибок определенных видов и кратностей формируется не всегда и в ходе экспериментов установлено, что правильный подбор образующего полинома для построения кода в основе СФК позволяет в ряде случаев строить системы с полной идентификацией ошибок. Для этого разработан общий алгоритм построения СФК с полным обнаружением одиночных неисправностей на основе полиномиальных кодов.

В случае если полное обнаружение ошибок на выходах диагностируемого устройства с помощью 1 способа построения систем считается невозможным предлагается формировать контролепригодные группы выходов.

2. Метод построения систем с разделением выходов на основе свойств полиномиальных кодов обнаруживающих определенные кратности ошибок.

В ходе исследований определены условия построения полиномиальных кодов полностью обнаруживающих ошибки кратностью $d=2$, $d=3$ и $d < m$. В целях сокращения числа контролепригодных групп СФК в диссертации предлагается использовать свойство полного обнаружения трехкратных ошибок для полного обнаружения неисправностей устройства. Для этого из множества выходов диагностируемого устройства осуществляется поиск 3-независимой группы выходов.

Определение 1. Множество выходов логической комбинационной схемы $\{f_{i_1}, f_{i_2}, \dots, f_{i_q}\} (q \geq 3)$ называется **3-независимой группой выходов** (НЗ-группа) если неисправность выхода любого логического элемента искажает не более трех выходов группы.

Поиск НЗ-групп выходов выполняется по выражению:

$$\frac{\partial f_i}{\partial y_\varphi} \frac{\partial f_j}{\partial y_\varphi} \frac{\partial f_r}{\partial y_\varphi} \frac{\partial f_q}{\partial y_\varphi} = 0, \quad (9)$$

где f – выходы диагностируемого устройства; y_φ – выходная функция логического элемента устройства, пути от которого ведут к трем и более выходам устройства.

Далее формируются контролепригодные группы. При построении СФК по принципу разделения выходов на контролепригодные группы, для каждой такой группы реализуется своя схема контроля.

В пятом разделе с учетом немалой стоимости современных систем технического диагностирования и мониторинга (СТДМ) объектов железнодорожной автоматики специализированных фирм-производителей

предложена их реализация на базе промышленных программируемых логических контроллеров (ПЛК) на примере продукции российского производителя (могут использоваться и любые другие ПЛК).

Предложено использование исследуемых кодов при логической обработке диагностических данных для СТДМ на основе ПЛК, так и для существующих. Помимо этого, для снижения нагрузки на вычислительное устройство и сокращения времени на обработку большого массива данных предлагается заменить полученные данные в несколько байт от конкретных контроллеров измерения аналоговых величин несколькими битами данных определенного диапазона пороговых значений параметров того или иного устройства, иными словами, «значимых» уровней аналоговых величин, по которым можно судить о конкретном состоянии диагностируемого устройства, а затем, полученный вектор данных закодировать полиномиальным кодом для защиты от сбоев аппаратных и программных средств.

Допустим, что система функционального контроля устройств ЖАТ осуществляет техническое диагностирование и мониторинг параметров рельсовой цепи. Например, пусть в нашем случае измеряются такие параметры станционной рельсовой цепи:

- 1) дискретные величины – данные с контакта путевого реле для определения свободности и занятости рельсовой цепи;
- 2) аналоговые величины – напряжения питания путевого реле; сопротивления изоляции кабеля между постом ЭЦ и изолирующим трансформатором релейного конца; сопротивления изоляции кабеля между постом ЭЦ и изолирующим трансформатором питающего конца; напряжение питания рельсовой цепи, снимаемое с клемм вторичной обмотки питающего трансформатора; напряжения на фидерах и полюсах питания.

Для каждого путевого приемника заводом-изготовителем устанавливаются конкретные значения напряжений и токов, при которых обеспечивается надежное функционирование устройства, например, таких как напряжение $U_{ср}$ (ток $I_{ср}$) срабатывания реле, напряжение $U_{от}$ (ток $I_{от}$) отпускания реле, рабочее напряжение U_p (ток I_p), напряжение $U_{нот}$ (ток $I_{нот}$) надежного отпускания и т.д.

На рис. 6 приведен пример квантования диапазона значимых величин напряжения (тока) путевого реле и принцип замены измеренных величин на векторы данных малой длины. Длина формируемого вектора данных может выбираться различной в зависимости от специфики диагностируемого

устройства и необходимости отражения полной картины режимов его работы, состояний и т.д.

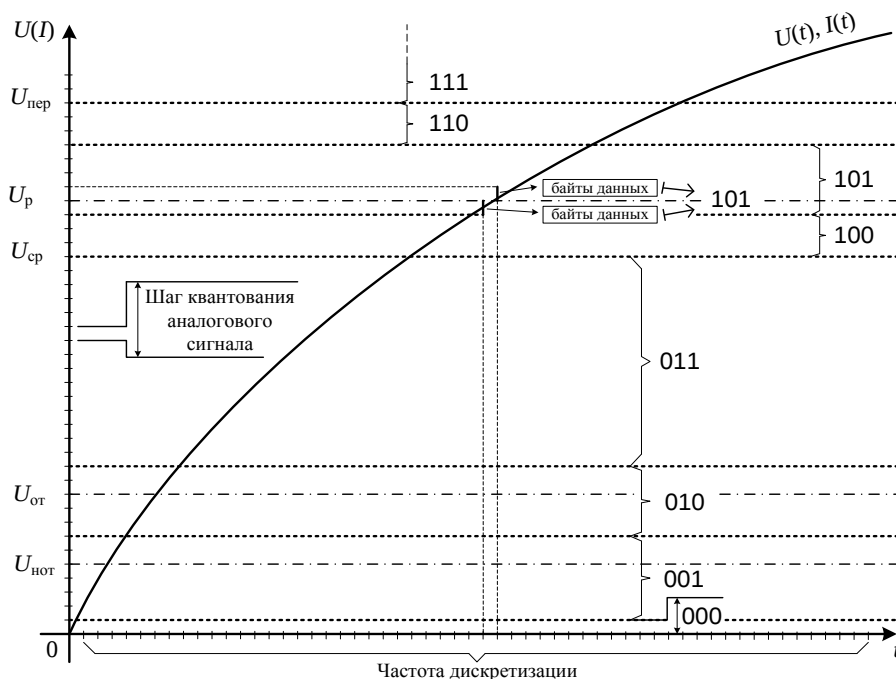


Рисунок 6. Принципы квантования уровней напряжения (тока) питания путевого реле по наиболее значимым диапазонам напряжений (токов) устройства

Таким образом, вместо изначальных десятка байт данных в нашем примере формируется вектор с числом бит: $1+2+2+3+3=14$ бит (рис. 7). Для надежности программного модуля закодируем полученный вектор полиномиальным кодом. Исходя из длины вектора данных предлагается использовать полином P_{25} , при использовании которого формируется 4 контрольных разряда.



Рисунок 7. Пример сформированного вектора из диагностических данных для логического анализа состояния рельсовой цепи

Сформированный вектор и будет использоваться при логическом анализе параметров диагностируемого устройства.

Таким образом, сформированным кодом будут обнаруживаться все одиночные и двукратные ошибки в информационном векторе, и лишь незначительная часть останется необнаруженной, доля которых от общего числа

необнаруживаемых ошибок составляет всего 6,24%. При сравнении используемых кодов с кодами Хэмминга, которые также полностью обнаруживают двукратные ошибки, можно привести то, что для формирования этих кодов при заданном значении m потребуется 5 контрольных разрядов, против используемых в предлагаемых кодах 4. Если сравнить используемый полиномиальный код с модульным кодом суммирования, то доля необнаруживаемых ошибок у SM кода при таких параметрах намного больше и составляет 14,93%, что более в 2 раза хуже, чем при $P25(14,4)$ -коде.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная диссертационная работа является законченным научным исследованием, посвященным развитию теории и методов функционального контроля устройств автоматики на основе применения полиномиальных кодов. В ходе исследований получены следующие основные результаты:

1. Установлены новые закономерности построения полиномиальных кодов, позволяющие получать коды с различными обнаруживающими характеристиками по видам и кратностям ошибок в информационных векторах.
2. Установлены новые свойства полиномиальных кодов, учет которых целесообразен при построении систем функционального контроля логических устройств.
3. Выделен ряд образующих полиномов, рекомендуемых для построения кода в основе системы функционального контроля, и с помощью которых строятся оптимальные и совершенные коды, а также коды с полным обнаружением конкретного вида и кратностей ошибок.
4. Получены вероятностные характеристики полиномиальных кодов заданного класса по видам ошибок и установлены зависимости максимального обнаружения ошибок малых кратностей любых видов.
5. Разработаны алгоритмы построения систем функционального контроля на основе полиномиальных кодов с полным обнаружением внутренних одиночных неисправностей диагностируемого устройства.
6. Предложен способ построения подсистемы сбора диагностических данных с объектов ЖАТ на основе промышленных логических контроллеров.
7. Предложен способ «сокращения» потока диагностических данных для их оптимального логического анализа методом квантования диапазона данных.

8. Предложен способ повышения надежности аппаратно-программных средств обработки диагностических данных в СТДМ, базирующийся на применении свойств изучаемых в диссертации кодов.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах, включенных в Перечень ведущих рецензируемых научных изданий Высшей аттестационной комиссии Российской Федерации

1. Сапожников В.В., Сапожников Вл.В., Ефанов Д.В., Абдуллаев Р.Б. О свойствах полиномиальных кодов в системах функционального контроля // Информатика и системы управления. – 2018. – №2. – С. 50-61. – DOI: 10.22250/isu.2018.56.50-61.
2. Сапожников В.В., Сапожников Вл.В., Ефанов Д.В., Абдуллаев Р.Б. Особенности организации систем функционального контроля комбинационных схем на основе полиномиальных кодов // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2018. – Т.15. – №3. – С. 432-445.
3. Абдуллаев Р.Б. Свойства полиномиальных кодов в системах функционального контроля комбинационных логических схем // Автоматика на транспорте. – 2018. – Том 4. – №4. – С. 655-686.
4. Ефанов Д.В., Абдуллаев Р.Б. Построение полиномиальных кодов, обнаруживающих отдельные подклассы немонотонных ошибок в информационных векторах // Информатика и системы управления. – 2019. – №2. – С. 87-98. – DOI: 10.22250/isu.2019.60.87-98.
5. Абдуллаев Р.Б. Вероятностные характеристики полиномиальных кодов в системах технического диагностирования // Автоматика на транспорте. – 2020. – Том 6. – №1. – С. 64-88. – DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-1-64-88.
6. Абдуллаев Р.Б. Полиномиальные коды с обнаружением любых симметричных и асимметричных ошибок в информационных векторах // Наука и техника транспорта. – 2020. – №1. – С. 80-92.
7. Абдуллаев Р.Б. Реализация подсистемы сбора диагностической информации в системах непрерывного мониторинга устройств железнодорожной автоматики на программируемых логических контроллерах // Автоматика на транспорте. – 2020. – Том 6. – №3. – С. 309-331. – DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-3-309-331.

Публикации в других изданиях

8. Efanov D., Plotnikov D., Sapozhnikov V., Sapozhnikov Vl., Abdullaev R. Experimental Studies of Polynomial Codes in Concurrent Error Detection Systems of Combinational Logical Circuits // Proceedings of 16th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2018), Kazan, Russia, September 14-17, 2018, pp. 184-190. – DOI: 10.1109 / EWDTS.2018.8524684 (*индексирована в SCOPUS*).

Ефанов Д., Плотников Д., Сапожников В., Сапожников Вл., Абдуллаев Р. Экспериментальные исследования полиномиальных кодов в системах функционального контроля логических комбинационных схем // Материалы 16-го симпозиума IEEE East-West Design & Test (EWDTS'2018), г. Казань, Россия, 14-17 сентября, 2018, – С. 184-190. – DOI: 10.1109 / EWDTS.2018.8524684.

9. Abdullaev R.B., Efanov D.V., Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov Vl.V. Polynomial Code with Detecting the Symmetric and Asymmetric Errors in the Data Vectors // Proceedings of 17th IEEE East-West

Design & Test Symposium (EWDTS'2019), Batumi, Georgia, September 13-16, 2019, pp. 157-161. – DOI: 10.1109/EWDTS.2019.8884451 (*индексирована в SCOPUS*).

Абдуллаев Р.Б., Ефанов Д.В., Сапожников В.В., Сапожников Вл.В. Полиномиальные коды с обнаружением симметричных и асимметричных ошибок в информационных векторах // Материалы 17-го симпозиума IEEE East-West Design & Test (EWDTS'2019), г. Батуми, Грузия, 13-16 сентября, 2019, – С. 157-161. – DOI: [10.1109/EWDTS.2019.8884451](https://doi.org/10.1109/EWDTS.2019.8884451).

10. *Сапожников В.В., Сапожников Вл.В., Ефанов Д.В., Абдуллаев Р.Б.* Полиномиальные коды в системах функционального контроля комбинационных логических схем // Новые информационные технологии в исследовании сложных структур: Материалы 12-й международной конференции, 4 – 8 июня 2018 года. – Томск: Издательский дом Томского государственного университета, 2018, с. 95-96. – ISBN 978-5-94621-698-2.

11. *Ефанов Д.В., Абдуллаев Р.Б.* Ресурсосберегающая технология синтеза контролепригодных компонентов безопасных систем управления на основе функционального диагностирования // Научные труды республиканской научно – технической конференции с участием зарубежных ученых “Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте” (18-19 декабря 2018 г.); Под ред. проф. А.И. Адилходжаева. – Ташкент: ТашИИТ, 2019, 246-248.

12. *Абдуллаев Р.Б.* Современный подход к техническому диагностированию устройств железнодорожной автоматики в условиях высокоскоростного движения в республике Узбекистан // Проблемы безопасности на транспорте: материалы IX международной научно-практической конференции: в 2 ч., Ч. 1 / Министерство транспорта и коммуникаций Республики Беларусь, Белорусская ж.д., Белорусский государственный университет транспорта; под общей редакцией Ю. И. Кулаженко. – Гомель: БелГУТ, 2019. – С. 216-218. – ISBN 978-985-554-878-3 (ч. 1).

13. *Ефанов Д.В., Абдуллаев Р.Б.* Использование промышленных датчиков и радиоканала для передачи диагностических данных при организации систем мониторинга устройств железнодорожной автоматики // Научные труды республиканской научно – технической конференции с участием зарубежных ученых “Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте” (20-21 декабря 2019 г.); Под ред. проф. А.И. Адилходжаева. – Ташкент: ТашИИТ, 2019, 228-232.

14. *Ефанов Д.В., Абдуллаев Р.Б.* Система непрерывного мониторинга устройств железнодорожной автоматики на основе программируемых логических контроллеров // Научные труды республиканской научно – технической конференции с участием зарубежных ученых “Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте” (20-21 декабря 2019 г.); Под ред. проф. А.И. Адилходжаева. – Ташкент: ТашИИТ, 2019, 232-236.

15. *Ефанов Д.В., Абдуллаев Р.Б.* Методы синтеза самопроверяемых логических устройств на основе полиномиальных кодов // Проблемы безопасности на транспорте: материалы X международной научно-практической конференции: в 5 ч., Ч. 1 / Министерство транспорта и коммуникаций Республики Беларусь, Белорусская ж.д., Белорусский государственный университет транспорта; под общей редакцией Ю. И. Кулаженко. – Гомель: БелГУТ, 2020. – С. 18-20. – ISBN 978-985-554-942-1 (ч. 1).

Подписано к печати

«08» апреля 2021

Формат 60×84 1/16

Печать – ризография

Бумага для множит.апп.

Печ. л. 1

Тираж 100 экз.

Заказ №

СР ФГБОУ ВО ПГУПС 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9