

На правах рукописи



Кленов Дмитрий Викторович

**РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И АЛГОРИТМОВ
ДЛЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ КАНАЛОВ
ПОВЫШЕННОЙ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ**

Специальность 05.13.18 – Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Саратов 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Львов Алексей Арленович

Официальные
оппоненты: *Прохоров Сергей Антонович,*
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследова-
ТЕЛЬСКИЙ университет имени академика
С.П. Королева», г. Самара

Андрейченко Дмитрий Константинович,
доктор физико-математических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследова-
ТЕЛЬСКИЙ государственный университет имени
Н.Г. Чернышевского», г. Саратов

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Астраханский государственный техни-
ческий университет», г. Астрахань

Защита состоится 04 июня 2020 г. в 13:00 часов на заседании диссертаци-
онного совета Д 212.242.08 при СГТУ имени Гагарина Ю.А. по адресу:
410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, корп. 1, ауд. 319.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СГТУ имени Гагари-
на Ю.А. и на сайте www.sstu.ru

Автореферат разослан «___» апреля 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.242.08
к.ф.-м.н., доцент



Корчагин Сергей Алексеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Разработка математических моделей и алгоритмов, способных реализовать повышенную помехоустойчивость современных информационных каналов (ИК), структурно содержащих каналы связи (КС) и кодеки – устройства кодирования (КУ) и декодирования (ДКУ), в первую очередь, диктуется требованиями обеспечения достоверного приёма информации, передаваемой в условиях ограничений и неконтролируемых внешних воздействий (в частности, помех) со стороны КС.

Вопросы построения и анализа математических моделей КС различных типов рассмотрены в целом ряде работ отечественных (А.А. Марков, Л.М. Финк, Б.Я. Советов, А.Г. Зюко, А.А. Гладких, К.К. Васильев, И.А. Голяницкий, В.А. Игнатов, Ю.Л. Сагалович и др.) и зарубежных (С.Е. Shannon, R.W. Hamming, D. Hilbert, B.D. Fritchman, T. Richardson, S. Haykin, J.J. Proakis, C. Pimentel, F. Blake, A. Das и др.) авторов.

Математические модели КУ и ДКУ для различных кодов и режимов работы предложены и исследованы во многих работах в нашей стране (В.В. Золотарев, Г.В. Овечкин, В.А. Борисов, В.В. Калмыков, В.П. Шувалов, Э.Л. Блох, В.В. Зяблов, Г.И. Никитин и др.) и за рубежом (D. Forney, D.A. Huffman, E.R. Berlekamp, J.J. Proakis, A.J. Viterbi, B. Sklar, F.J. Mac Williams, G.C. Clark, P. Elias, S. Lin, E.J. Weldon, R.E. Blahut и др.).

Вместе с тем задачам моделирования и анализа ИК в целом как совокупности КС, КУ и ДКУ уделено не достаточное внимание. В частности, мало исследованы недвоичные (К-ичные) ИК, не учтены особенности работы кодеков при последовательном и поочерёдном кодировании различными кодами (каскадные ИК), что не позволяет реализовать ИК с требуемыми показателями достоверности приёма в условиях действия импульсных случайных помех большой интенсивности, когда средний период следования импульсов помех как минимум втрое меньше времени передачи кодовых посылок.

Кроме того, известные модели, рассчитанные на использование, как правило, синхронного последовательного интерфейса с последовательной поочерёдной побитовой или побайтовой передачей кодовых сигналов, не учитывают вопросы обеспечения синхронизации (синхронно-синфазных режимов) работы кодеков. Поэтому актуальна задача синтеза математических моделей и алгоритмов для ИК повышенной помехоустойчивости при надёжной синхронно-синфазной работе кодеков в условиях действия импульсных случайных помех большой интенсивности.

В связи с этим перспективными представляются модели с корректирующим первичным кодом $K_{\text{перв}}$ в первых каскадах кодирования, каждый элемент которого кодируется дополнительно в последнем каскаде кодирования защитным вторичным кодом $K_{\text{втор}}$ с кодовым сигнальным признаком (КСП) (Р.И. Юргенсон, М.С. Светлов, А.А. Львов). Однако для кода с КСП не предложена математическая модель, отсутствуют алгоритмы кодирования и декодирования и не решена задача определения вероятностей исходов приёма (правильного и ложного приёмов и защитного отказа) по заданным статистическим характеристикам импульсных случайных помех в КС. Это также определяет актуальность темы работы и необходимость проводимых исследований.

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является повышение помехоустойчивости ИК при одновременном обеспечении надёжной синхронно-синфазной работы кодеков в условиях действия в КС импульсных случайных помех большой интенсивности за счёт разработки новых математических моделей, методов и алгоритмов работы каскадных K -ичных ИК, основанных на применении защитного кодирования кодом с КСП.

Поставленная цель достигается решением следующих **задач**:

1. Разработка математической модели кода с КСП.
2. Получение для кода с КСП алгоритмов кодирования и декодирования.
3. Получение для ИК с использованием кода с КСП аналитических зависимостей вероятностей исходов приёма от заданных статистических характеристик импульсных случайных помех в КС, применимых при воздействии случайных последовательностей импульсов помех с произвольными законами распределения амплитуд.
4. Разработка математических моделей каскадных K -ичных ИК, отличающихся от существующих применением в последнем каскаде кодирования кода с КСП, что в условиях действия в КС импульсных случайных помех большой интенсивности даёт возможность реализации ИК повышенной помехоустойчивости.
5. Разработка критерия эффективности моделей ИК, позволяющего проводить количественную сравнительную оценку эффективности моделей каскадных K -ичных ИК.
6. Разработка программного комплекса численного моделирования каскадных K -ичных ИК, в т.ч. с применением кода с КСП, дающего возможность синтеза и исследования моделей каскадных K -ичных ИК повышенной помехоустойчивости с надёжной синхронно-синфазной работой кодеков.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования является ИК, функционирующий в условиях действия импульсных случайных помех большой интенсивности.

Предметом исследования являются математические модели и алгоритмы, позволяющие создавать каскадные K -ичные ИК повышенной помехоустойчивости при одновременном обеспечении надёжной синхронно-синфазной работы кодеков в условиях действия импульсных случайных помех большой интенсивности.

Методы исследования. В работе используются общие методы теории кодирования, линейной алгебры, теории вероятностей и математической статистики, дискретной математики, математического анализа, а также методы вычислительной математики и имитационного моделирования.

Научная новизна результатов, полученных в ходе диссертационного исследования, состоит в следующем:

1. Предложена математическая модель кода с КСП, отличающаяся от известных моделей возможностью замены передачи по КС элементов первичного корректирующего кода $K_{\text{перв}}$, не обладающего достаточной помехоустойчивостью, передачей серий импульсов малой длительности с фиксированными временными интервалами между ними, позволяющих парировать импульсные случайные помехи большой интенсивности.
2. Разработаны алгоритмы кодирования и декодирования для кода с КСП, отличающиеся гарантированным исправлением ошибок в $\text{ДКУ}_{K_{\text{перв}}}$ первичного

кода в случае возникновения защитного отказа в ДКУ_{Квтор} вторичного кода, что позволяет в условиях действия в КС импульсных случайных помех большой интенсивности уменьшить вероятность неправильного приёма не менее чем на два порядка.

3. Для ИК с использованием кода с КСП получены аналитические зависимости вероятностей исходов приёма от заданных статистических характеристик импульсных случайных помех в КС, применимые при действии случайных последовательностей импульсов помех с произвольными законами распределения амплитуд, что даёт возможность формульной оценки достоверности приёма в ИК с применением кода с КСП.

4. Разработаны математические модели каскадных K -ичных ИК, отличающиеся от существующих применением в последнем каскаде кодирования самосинхронизирующегося защитного кода с КСП, что в условиях действия в КС импульсных случайных помех большой интенсивности даёт возможность полностью исключить появление ошибок синхронизации кода вторичного кода $K_{\text{втор}}$, снизить вероятность ошибок синхронизации кода первичного кода $K_{\text{перв}}$ как минимум в пять раз и повысить информационную надёжность каскадных K -ичных ИК в среднем на 1–2%, что существенно при большом объёме передаваемой информации.

5. Разработан обобщённый сравнительный критерий эффективности моделей ИК, отличающийся от известных применимостью как к классическим моделям ИК, так и к моделям ИК с альтернативной метрикой и моделям с использованием кода на основе КСП, позволяющий проводить количественную сравнительную оценку моделей каскадных K -ичных ИК.

Работа соответствует паспорту научной специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»: п. 4, 5 и 7.

Научная и практическая значимость.

Разработанные математические модели каскадных K -ичных ИК, математические модели и алгоритмы кодирования-декодирования для кода с КСП и аналитические формулы вероятностей исходов приёма дают возможность синтезировать каскадные K -ичные ИК повышенной помехоустойчивости, способные функционировать в условиях действия в КС импульсных случайных помех большой интенсивности. Разработанный программный комплекс позволяет проводить численное моделирование, исследование и синтез моделей каскадных K -ичных ИК, в т.ч. с применением кода на основе КСП, обеспечивающих повышенную достоверность приёма информации.

На защиту выносятся следующие основные положения и результаты:

1. Предложенная математическая модель кода с КСП, дающая возможность замены передачи по КС элементов первичного корректирующего кода $K_{\text{перв}}$, не обладающего достаточной помехоустойчивостью, передачей серий импульсов малой длительности с фиксированными временными интервалами между ними, позволяющих парировать импульсные случайные помехи большой интенсивности.

2. Разработанные алгоритмы кодирования и декодирования для кода с КСП, обеспечивающие гарантированное исправление ошибок в ДКУ_{Кперв} первичного кода в случае возникновения защитного отказа в ДКУ_{Квтор} вторичного кода, что в условиях действия в КС импульсных случайных помех большой интенсивности позволяет уменьшить вероятность неправильного приёма не менее чем на два порядка.

3. Полученные для ИК с использованием кода с КСП аналитические зависимости вероятностей исходов приёма от заданных статистических характеристик импульсных случайных помех в КС, применимые при действии случайных последовательностей импульсов помех с произвольными законами распределения амплитуд, что даёт возможность формульной оценки достоверности приёма в ИК с использованием кода с КСП.

4. Разработанные математические модели каскадных K -ичных ИК, отличающиеся от существующих применением в последнем каскаде кодирования самосинхронизирующегося защитного кода с КСП, что в условиях действия в КС импульсных случайных помех большой интенсивности даёт возможность полностью исключить появление ошибок синхронизации кодека вторичного кода $K_{\text{втор}}$, снизить вероятность ошибок синхронизации кодека первичного кода $K_{\text{перв}}$ как минимум в пять раз и повысить информационную надёжность каскадных K -ичных ИК в среднем на 1–2%, что существенно при большом объёме передаваемой информации.

5. Разработанный обобщённый критерий эффективности моделей ИК, отличающийся от известных применимостью как к классическим моделям ИК, так и к моделям ИК с альтернативной метрикой и моделям с использованием кода на основе КСП, позволяющий проводить количественную сравнительную оценку моделей каскадных K -ичных ИК.

6. Разработанный программный комплекс численного моделирования каскадных K -ичных ИК, в т.ч. с применением кода на основе КСП, дающий возможность синтеза и исследования моделей каскадных K -ичных ИК повышенной помехоустойчивости с надёжной синхронно-синфазной работой кодеков.

Реализация и внедрение. Предложенные в работе математические модели, методы и алгоритмы использованы при построении модели радиоканала для перспективной системы беспроводных датчиков, разрабатываемой в ООО НТК «Сигнал» (Сколково) и планируемой к установке на борту летательного аппарата с целью повышения информационной надёжности и упрощения конструкции телеметрических ИК, а также снижения веса и повышения экономической эффективности летательного аппарата. Кроме того, результаты исследований внедрены в Институте проблем точной механики и управления РАН и в учебный процесс на кафедре «Информационно-коммуникационные системы и программная инженерия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А., что подтверждено актами использования результатов исследований.

Апробация результатов. Основные результаты работы обсуждались и докладывались на XII и XIII Международных научно-технических конференциях «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП-2016 (Саратов, 2016), АПЭП-2018 (Саратов, 2018); Международных научно-практических конференциях «Информационно-коммуникационные технологии в науке, образовании и производстве» ICIT-2016 (Саратов, 2016), ICIT-2017 (Саратов, 2017), ICIT-2019 (Саратов, 2019); X Международной научно-технической конференции «Dynamics of systems, mechanisms and machines» Dynamics-2016 (Омск, 2016); Международных конференциях молодых исследователей России по электротехнике и электронике ElConRus-2017 (Санкт-Петербург, 2017), ElConRus-2018 (Санкт-Петербург, 2018), ElConRus-2020 (Санкт-Петербург, 2020); XXVII Международной конференции «The microwave and radio electronics week 2017» Marew-2017 (Brno, Czech Republic, 2017); на Международных научно-технических конференциях «Перспективные

информационные технологии» ПИТ-2017 (Самара, 2017), ПИТ-2018 (Самара, 2018); VIII и IX Всероссийских научных конференциях «Системный синтез и прикладная синергетика» ССПС-2017 (пос. Нижний Архыз, 2017), ССПС-2019 (пос. Нижний Архыз, 2019); V юбилейной и VI Международных научных конференциях «Проблемы управления, обработки и передачи информации» УОПИ-2017 (Саратов, 2017), УОПИ-2018 (Саратов, 2018); VIII Международной научной конференции «Компьютерные науки и информационные технологии» памяти А.М. Богомоллова КНиИТ-2018 (Саратов, 2018); Международной научно-технической конференции «Systems of signal synchronization, generating and processing in telecommunications» SYNCHROINFO (Минск, Беларусь, 2018).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 25 печатных работ, в том числе 3 в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 8 работ в изданиях, входящих в базу Scopus, 1 публикация без соавторов и 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ. Полный список работ приведён в диссертации.

Личный вклад автора: получение математической модели кода с КСП; разработка алгоритмов кодирования и декодирования для кода с КСП; вывод аналитических зависимостей вероятностей исходов приёма от заданных статистических характеристик импульсных случайных помех; разработка разнотипных математических моделей каскадных K -ичных ИК с применением кода с КСП; синтез многопараметрического критерия эффективности математических моделей ИК; разработка программного обеспечения для проведения численного моделирования каскадных K -ичных ИК с применением кода с КСП.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, библиографического списка в алфавитном порядке, списка рисунков, списка таблиц и двух приложений. Полный объём диссертации составляет 150 страниц, включая 5 лемм, 6 теорем, 35 рисунков и 2 таблицы. Список литературы содержит 93 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновываются актуальность, научная новизна и практическая значимость диссертационной работы, определяются цель и задачи, объект и предмет исследования. Также выделяются основные положения, выносимые на защиту, приводится информация об апробации и общей структуре диссертации.

Первая глава диссертации посвящена анализу существующих способов обеспечения помехоустойчивой передачи сообщений. Рассматриваются модели ИК с корректирующими кодами на основе метрики Хемминга и альтернативной кодовой метрики, а также модели каскадных ИК. В результате анализа делается вывод о недостаточной информационной надёжности существующих моделей ИК при большой интенсивности импульсных случайных помех. Обосновывается необходимость разработки и исследования новых математических моделей ИК повышенной помехоустойчивости, в частности, моделей каскадных K -ичных ИК с применением защитного вторичного кода $K_{\text{втор}}$ на основе КСП.

Во второй главе работы исследуются предложенные математическая модель, алгоритмы кодирования и декодирования вторичного кода $K_{\text{втор}}$ с КСП и зависимости вероятностей исходов приёма от заданных статистических характеристик импульсных случайных помех в КС каскадного K -ичного ИК, структура которого приведена на рис. 1.

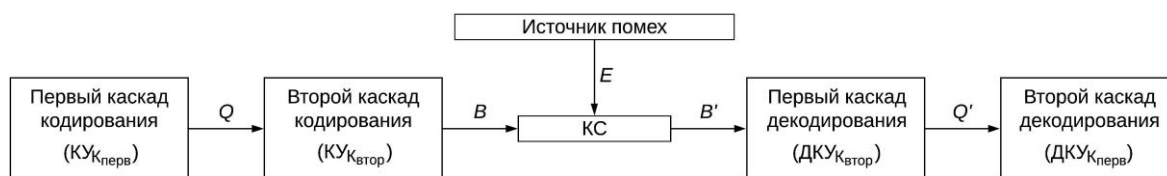


Рисунок 1 – Структура каскадного K -ичного ИК:

$KУ_{Kперв}$, $KУ_{Kвтор}$ и $ДКУ_{Kперв}$, $ДКУ_{Kвтор}$ – кодирующие и декодирующие устройства (кодеки) первичного и вторичного кодов, соответственно; Q , B и B' , Q' – выходные кодовые комбинации кодирующих устройств $KУ_{Kперв}$ первичного и $KУ_{Kвтор}$ вторичного кодов и входные искажённые помехами E кодовые комбинации декодирующих устройств $ДКУ_{Kвтор}$ вторичного и $ДКУ_{Kперв}$ первичного кодов, соответственно

Математическая модель ИК рассматривается при следующих допущениях.

Допущение 1.1. Импульсные случайные помехи возникают только в КС и не возникают из-за некорректной работы кодеков.

Допущение 1.2. Помехи представляются как аддитивный импульсный случайный поток интенсивности $i_{pn} = f_{pn}/f_c \geq 3$ (i_{pn} – интенсивность импульсной случайной помехи; f_{pn} , f_c – частоты помехи и кода, соответственно), что эквивалентно использованному ранее определению интенсивности импульсной случайной помехи при условии непрерывной передачи кодовых посылок от первого каскада ко второму каскаду кодирования.

В соответствии с предложенной структурой модели каскадного K -ичного ИК в первом каскаде кодирования на основе исходных требований по объёму и помехоустойчивости подлежащей передаче информации $KУ_{Kперв}$ формирует различные последовательности K -ичных символов, представляющие собой кодовые слова (кодовые комбинации) Q , совокупность которых является первичным корректирующим кодом $K_{перв}$.

С целью обеспечения требуемого уровня достоверности передачи информации по КС в условиях действия импульсных случайных помех большой интенсивности вводится второй каскад кодирования защитным кодом, формирующим вместо символов первичного кода $K_{перв}$ соответствующие последовательности B двоичного кода, совокупность которых является защитным вторичным кодом $K_{втор}$. Каждая такая двоичная последовательность при передаче по КС реализуется в виде последовательности импульсных сигналов. При этом используется кодовый сигнальный признак КСП, при котором передача сигналов по реальному КС осуществляется последовательностями импульсов принципиально малой длительности τ с фиксированными интервалами между ними, кратными заданному интервалу времени Δt ($\Delta t \gg \tau$) (рис. 2).

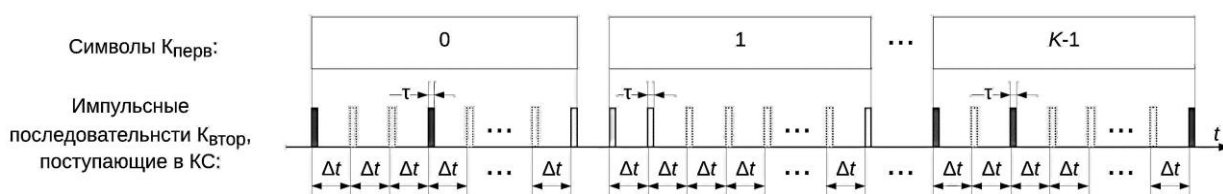


Рисунок 2 – Представление символов первичного кода $K_{перв}$ с помощью кодовых слов (последовательностей) вторичного кода $K_{втор}$ с их последующей передачей по КС серией рабочих импульсов малой длительности

Каждая (из K – по числу элементов в алфавите $\alpha = \{0, 1, \dots, K - 1\}$ K -ичного первичного кода) n -разрядная двоичная кодовая комбинация вторич-

ного кода содержит ровно m_1 единичных символов с обязательным расположением двух из них (краевые единичные символы) на местах первого и последнего разрядов. В результате этого все кодовые комбинации отличаются друг от друга расположением $(m_1 - 2)$ внутренних единичных символов, которые определяют кодовое расстояние d_{min} (следовательно, и помехоустойчивость) вторичного кода $K_{втор}$. Значение m_1 считается заданным и заранее выбирается на основе критерия эффективности моделей ИК, рассмотренного в третьей главе.

Учитывая сказанное выше, математическая модель кода с КСП определяет принцип представления символа $i \in \alpha$ первичного кода $K_{перв}$ двоичным кодовым словом (двоичной последовательностью) A_i вторичного кода $K_{втор}$ с КСП, удовлетворяющим следующим свойствам:

- длина кодового слова $A_i - n \geq 5$;
- вес кодового слова $A_i - m_1$ ($3 \leq m_1 \leq n - 2$), таким образом, позиции единичных символов кодового слова A_i могут быть обозначены как μ_{iu} , где $1 \leq u \leq m_1$, $1 \leq \mu_{iu} \leq n$;
- первый и последний символы кодового слова A_i – единичные ($\mu_{i1} = 1$, $\mu_{im_1} = n$);
- передача кодового слова A_i по КС осуществляется серией импульсов длительности $\tau \ll \Delta t$, формируемых в моменты времени $T_{iu} = (\mu_{iu} - 1)\Delta t$, причём формирование всей последовательности завершается за время $T_A = (n - 1)\Delta t$;
- никакое кодовое слово A_i не является циклическим сдвигом никакого другого кодового слова A_j . Под k -м циклическим сдвигом некоторой последовательности $B = (b_1, b_2, \dots, b_n)$ длины n ($1 \leq k \leq n - 1$) понимается новая последовательность $L_k(B) = (b_{k+1}, b_{k+2}, \dots, b_n, b_1, \dots, b_k)$.

Таким образом, математическая модель кода с КСП может быть представлена следующей системой соотношений – равенств и неравенств:

$$\left\{ \begin{array}{l} |A| \leq C_{n-2}^{m_1-2}, \quad n \geq 5, \quad 3 \leq m_1 \leq n - 2; \\ T_{iu} = (\mu_{iu} - 1)\Delta t, \quad 1 \leq u \leq m_1, \quad 1 \leq \mu_{iu} \leq n; \\ (\forall i, j \in \alpha, i \neq j \quad \forall k: 1 \leq k \leq n - 1) \quad A_i \neq L_k(A_j), \end{array} \right.$$

где $C_{n-2}^{m_1-2}$ – число сочетаний из $n - 2$ элементов по $m_1 - 2$ элементов.

Для заданных значений K и m_1 всегда может быть получен вторичный код $K_{втор}$ с КСП минимально возможной длины n_{min} , обеспечивающий максимально возможное значение $(d_{min})_{max}$ минимального кодового расстояния в наборе кодовых слов вторичного кода $K_{втор}$. Для синтеза такого набора кодовых слов создана программа для ЭВМ. Получено свидетельство о государственной регистрации разработанной программы.

В диссертации разработаны все алгоритмы, необходимые для работы каскадных K -ичных ИК с применением вторичного кода $K_{втор}$ с КСП. В качестве примера ниже приведены только основные алгоритмы, в частности, кодирования и декодирования для кода с КСП.

Алгоритм 1 (кодирования вторичным кодом $K_{втор}$ с КСП). Пусть n_K – длина K -ичных кодовых слов (кодовых комбинаций) первичного кода $K_{перв}$, сформированного в КУ_{Кперв} первого каскада кодирования. Для кодирования некоторого произвольного кодового слова $Q = (q_1, q_2, \dots, q_{n_K})$ первичного кода $K_{перв}$ каждый его символ q_w ($1 \leq w \leq n_K$) в КУ_{Квтор} второго каскада кодирования заменяется единичным вектором I_{q_w} разрядности K_A (K_A – количество элементов во множе-

стве $A = \{A_i\}_{i \in \alpha}$ кодовых слов вторичного кода $K_{\text{втор}}$ с КСП; i – значение символа в алфавите α). Каждый единичный вектор I_i содержит только один единичный символ на позиции, номер которой совпадает со значением символа i : $I_i = (\underbrace{0, 0, \dots, 0}_i \text{ позиций}, 1, \underbrace{0, 0, \dots, 0}_{K_A - i - 1 \text{ позиций}})$. Затем из полученных векторов составляется матрица $Q = (I_{q_1}, I_{q_2}, \dots, I_{q_{n_K}})^T$, (T – знак транспонирования). Процедура кодирования заключается в представлении матрицы B в виде произведения матрицы Q на матрицу A кодовых слов вторичного кода $K_{\text{втор}}$ с КСП, записанных в виде векторов:

$$B = Q \cdot A.$$

Полученная матрица B представляет собой результат кодирования кодом с КСП.

Алгоритм 2 (декодирования вторичного кода $K_{\text{втор}}$ с КСП). Для декодирования принятой информации в виде $B' = B \oplus E$, где $\oplus$ – операция сложения по модулю два, E – матрица векторов ошибок, в ДКУ $K_{\text{втор}}$ первого каскада декодирования сначала вычисляется матрица подобия S (аналог матрицы синдромов для алгебраических кодов), описывающая степень «близости» результата к каждому из символов первичного кода $K_{\text{перв}}$:

$$S = B' \cdot A^T. \quad (1)$$

Умножение проводится над полем целых чисел $\mathbb{Z}$, поэтому матрица S – не-двоичная. Затем строится матрица результата R :

$$R = \{r_{wi}\}, r_{wi} = \begin{cases} 1, & s_{wi} = m_1 \\ 0, & s_{wi} < m_1 \end{cases}. \quad (2)$$

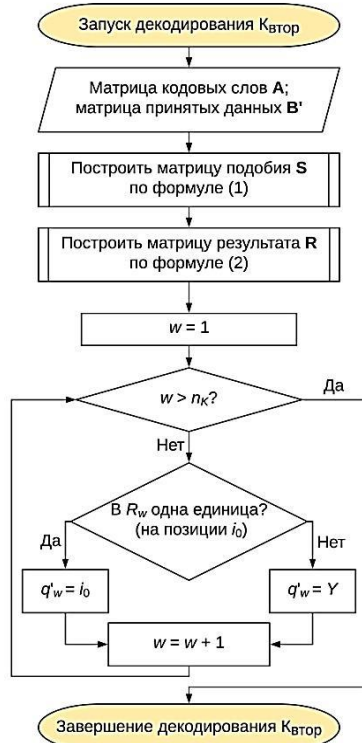


Рисунок 3 – Блок-схема алгоритма декодирования вторичного кода $K_{\text{втор}}$ с КСП

Для завершения декодирования матрица R анализируется построчно и формируются входные кодовые комбинации ДКУ $K_{\text{перв}}$ в виде кодовых слов Q' $K_{\text{перв}}$, изменённых воздействием импульсных помех: $Q' = (q'_1, q'_2, \dots, q'_{n_K})$.

Вычисление значений изменённых импульсными помехами символов q'_w ($1 \leq w \leq n_K$) первичного кода $K_{\text{перв}}$ происходит следующим образом: если в строке w матрицы R только одна единица (обозначим её столбец через i_0), то делается вывод, что $q'_w = i_0$; если же в w -й строке матрицы R единиц две и более или же нет вовсе, то декодирование вторичного кода $K_{\text{втор}}$ с КСП не возможно, и формируется особый и единый для всех кодовых комбинаций вторичного кода $K_{\text{втор}}$ символ Y первичного кода $K_{\text{перв}}$ ($q'_w = Y$), что даёт возможность реализации второго каскада декодирования ДКУ $K_{\text{перв}}$ первичного кода $K_{\text{перв}}$ по алгоритму Элайеса-Юргенсона, обеспечивающего гарантированное исправление символов Y первичного кода $K_{\text{перв}}$ по аналогии с ошибками стирания в каналах со стиранием. Блок-схема алгоритма декодирования вторичного кода $K_{\text{втор}}$ с КСП приведена на рис 3.

Так как рассматривается модель ИК с последовательным синхронным интерфейсом, то далее в диссертации исследован вариант внутренней циклической синхронизации кодека первичного кода $K_{\text{перв}}$ с использованием специальной последовательности символов $K_{\text{перв}}$ – синхропосылки (СП). В работе рассмотрено два способа защищённой передачи СП с помощью вторичного кода $K_{\text{втор}}$ с КСП. В первом случае (способ №1) СП посимвольно кодируется и декодируется, соответственно, КУ_{Квтор} и ДКУ_{Квтор} вторичного кода $K_{\text{втор}}$ с КСП. Во втором случае (способ №2) СП кодируется целиком, для чего в набор кодовых слов вторичного кода $K_{\text{втор}}$ с КСП вводится отдельная кодовая комбинация A_{SP} , образуя расширенный набор кодовых слов $A^* = A \cup A_{SP}$. Результаты численного моделирования, полученные с помощью разработанного программного комплекса численного моделирования К-ичных ИК на основе предложенной математической модели, показали, что второй способ обеспечения синхронизации кодека первичного кода $K_{\text{перв}}$ более эффективен: вероятность сбоя синхронизации снижается примерно в 3–5 раз в условиях действия импульсных случайных помех большой интенсивности (рис. 4).

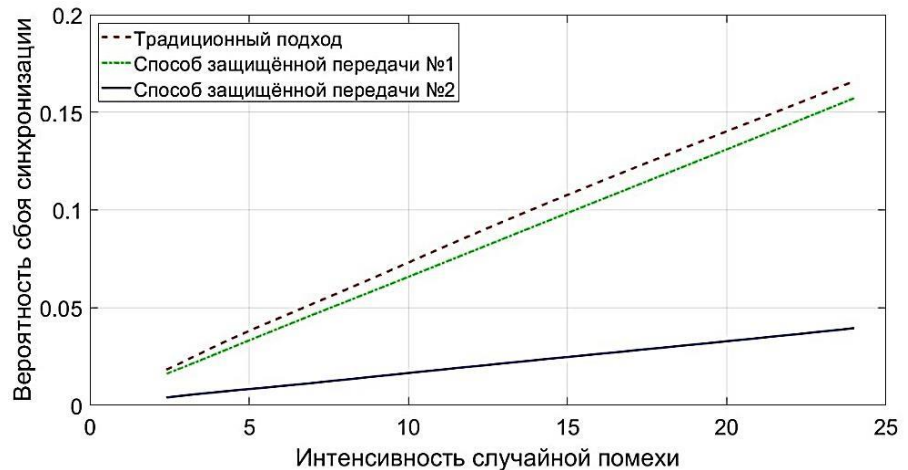


Рисунок 4 – Вероятность сбоя приёма СП при использовании различных способов обеспечения синхронизации $K_{\text{перв}}$

Для синхронизации кодека вторичного кода $K_{\text{втор}}$ с КСП никаких специальных мер не требуется: в работе доказывается, что код на основе КСП является самосинхронизирующимся, что ведёт к отсутствию ошибок синхронизации.

Далее проводится оценка обеспечиваемой предложенной моделью ИК достоверности приёма при условии отсутствия ошибок синхронизации в каждом из каскадов кодирования. Сначала с целью определения статистических характеристик КС в дополнение к допущениям 1.1 и 1.2 вводится ряд допущений относительно структуры помех, воздействующих в КС.

Допущение 2.1. Появление импульсов случайных помех подчиняется закону распределения Пуассона: вероятность воздействия $k_{pn} \geq 0$ импульсов помех на передаваемый символ первичного кода $K_{\text{перв}}$ выражается формулой

$$p(k_{pn}) = \frac{(i_{pn})^{k_{pn}}}{k_{pn}!} e^{-i_{pn}}.$$

Допущение 2.2. Закон распределения амплитуд импульсов помех A_{pn} задаётся в общем виде и характеризуется плотностью распределения $p(A_{pn} = x) = p(x)$.

Допущение 2.3. Рассматривается самый критичный для работы ДКУ_{Квтор} вторичного кода $K_{\text{втор}}$ случай, когда длительность импульсов помех совпадает с длительностью τ рабочих импульсов вторичного кода $K_{\text{втор}}$.

С учётом сформулированных допущений определяются статистические характеристики КС как вероятности трансформации единичных ($r_{10}(h)$) и нулевых ($r_{01}(h)$) символов вторичного кода $K_{\text{втор}}$ друг в друга:

$$r_{i,1-i}(h) = \sum_{k_{pn}=0}^{\infty} \frac{\left(i_{pn} \frac{\tau}{T_{op}}\right)^{k_{pn}}}{k_{pn}!} e^{-i_{pn} \frac{\tau}{T_{op}}} r_{i,1-i}^{(k_{pn})}(h), \quad (3)$$

где T_{op} – длительность символа первичного кода $K_{перв}$, а $r_{i,1-i}^{(k_{pn})}(h)$ – вероятности трансформации символа i вторичного кода $K_{втор}$ в символ $(1-i)$ под действием ровно k_{pn} импульсов помех, вычисляющиеся по формулам:

$$r_{10}^{(k_{pn})}(h) = \int_{-\infty}^{h-A_s} p^{(k_{pn})}(x) dx;$$

$$r_{01}^{(k_{pn})}(h) = \int_h^{+\infty} p^{(k_{pn})}(x) dx,$$

где A_s – амплитуда рабочего импульса вторичного кода $K_{втор}$.

Плотность распределения $p^{(k_{pn})}(x)$ суммы амплитуд ровно k_{pn} импульсов помех в общем случае вычисляется итеративно. Однако для таких наиболее распространённых частных случаев распределения амплитуд импульсов помех, как гауссовское или экспоненциальное, результат представим в формульном виде.

Далее необходимо определить связь между появлением символа $i \in \alpha$ первичного кода $K_{перв}$ на входе ИК с возможными исходами приёма на выходе ИК в зависимости от известных вероятностей искажения символов в КС.

Анализ алгоритма 2 позволяет заключить, что результат приёма передаваемого кодового слова $K_{втор} A_i$, $i \in \alpha$ определяется тремя факторами:

- результатом приёма краевых единичных символов кодовых слов вторичного кода $K_{втор}$;
- результатом приёма внутренних единичных символов правильного (передаваемого) кодового слова A_i вторичного кода $K_{втор}$;
- результатом приёма внутренних единичных символов каждого из $K_A - 1$ возможных ложных кодовых слов A_f , $f \in \alpha$, $f \neq i$ вторичного кода $K_{втор}$.

Для формализации влияния перечисленных выше факторов на исход приёма передаваемого символа $i \in \alpha$ первичного кода $K_{перв}$ разработана графоаналитическая модель (ГАМ) для ИК с применением кода с КСП (рис. 5). Приведённая ГАМ состоит из $K_A + 1$ последовательных секций: секции S по оценке влияния импульсов помех на приём краевых единичных символов кодовых слов вторичного кода $K_{втор}$ и K_A секций S_j ($j \in \alpha$) по оценке влияния импульсов помех на приём внутренних единичных символов кодового слова A_j $K_{втор}$, соответственно.

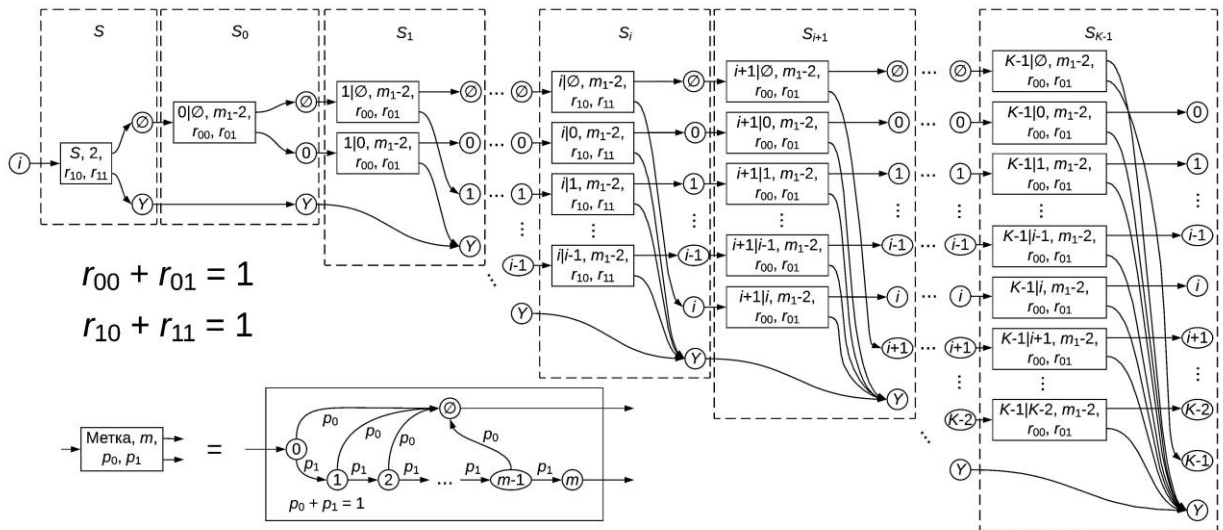


Рисунок 5 – ГАМ ИК с применением кода с КСП

Приведённая ГАМ позволяет вычислить вероятность декодирования символа $j \in \alpha \cup \{Y\}$ первичного кода $K_{\text{перв}}$ на выходе ИК по известной вероятности появления символа $i \in \alpha$ первичного кода $K_{\text{перв}}$ на входе ИК и заданным вероятностям (3) трансформации единичных и нулевых символов вторичного кода $K_{\text{втор}}$ друг в друга. Таким образом, ГАМ определяет зависимость вероятностей исходов приёма кода с КСП от статистических характеристик импульсных помех в КС и даёт возможность получения аналитического представления указанных зависимостей.

С целью структурирования итоговых формул, описывающих требуемые аналитические зависимости, рассматривается ряд вспомогательных подсобытий:

- $S(h)$ – приняты краевые единицы кодового слова вторичного кода $K_{\text{втор}}$;
- $A(h)$ – приняты внутренние единицы правильного кодового слова вторичного кода $K_{\text{втор}}$;
- $B_k(h)$ – приняты внутренние единицы ровно у k из $K_A - 1$ возможных ложных кодовых слов вторичного кода $K_{\text{втор}}$.

По известным значениям $r_{10}(h)$ и $r_{01}(h)$ вычисляются вероятности данных подсобытий:

- $s(h) = p(S(h)) = (1 - r_{10}(h))^2$;
- $a(h) = p(A(h)) = (1 - r_{10}(h))^{m_1-2}$;
- $b_k(h) = p(B_k(h)) = C_{K_A-1}^k (r_{01}^{m_1-2}(h))^k (1 - r_{01}^{m_1-2}(h))^{K_A-1-k}$.

Итоговый вид искомым аналитических выражений зависит от типа ИК, характеризующего возможными видами ошибок при приёме символов вторичного кода $K_{\text{втор}}$ в ДКУ $_{K_{\text{втор}}}$ и определяемого выбранным способом отождествления входных сигналов в ДКУ $_{K_{\text{втор}}}$ с символами вторичного кода $K_{\text{втор}}$. В работе рассматриваются два типа ИК: только с ошибками трансформации и общего вида – с ошибками трансформации и стирания.

В ИК только с ошибками трансформации амплитуда A_s входного сигнала в ДКУ $_{K_{\text{втор}}}$ сравнивается с единственным пороговым значением h_1 : сигнал с амплитудой $A_s \geq h_1$ отождествляется с единичным символом вторичного кода $K_{\text{втор}}$, а с амплитудой $A_s < h_1$ – с нулевым. Под ошибкой трансформации понимается приём нулевого символа вторичного кода $K_{\text{втор}}$ при передаче единичного и наоборот, приём единичного символа при передаче нулевого.

В ИК общего вида амплитуда A_s входного сигнала в ДКУ $_{K_{\text{втор}}}$ сравнивается с двумя пороговыми значениями $h_1 < h_2$, между которыми находится зона стирания: сигнал с амплитудой $A_s \geq h_2$ отождествляется с единичным символом, с амплитудой $A_s < h_1$ – с нулевым, а с амплитудой из диапазона $h_1 \leq A_s < h_2$ – с символом стирания X вторичного кода $K_{\text{втор}}$. К возможным ошибкам трансформации также добавляются ошибки стирания, под которыми понимается приём отсутствующего в исходном алфавите вторичного кода $K_{\text{втор}}$ символа стирания X $K_{\text{втор}}$ при передаче разрешённых нулевого или единичного символов $K_{\text{втор}}$.

Для ИК только с ошибками трансформации вероятности исходов приёма вычисляются по следующим формулам:

$$p_{cr} = s(h_1)a(h_1)b_0(h_1); \quad (4)$$

$$p_{fr} = s(h_1)(1 - a(h_1))b_1(h_1); \quad (5)$$

$$p_{pf} = (1 - s(h_1)) + s(h_1)[a(h_1)(1 - b_0(h_1)) + (1 - a(h_1))(1 - b_1(h_1))], \quad (6)$$

где p_{cr} и p_{fr} – вероятности правильного и ложного приёмов, соответственно, а p_{pf} – вероятность защитного отказа.

Для ИК общего вида справедливы следующие формулы для вычисления вероятностей исходов приёма:

$$\begin{aligned}
 p_{cr} &= s(h_1)a(h_1)b_0(h_1) + s(h_2)a(h_2)\sum_{k=1}^{K_A-1} b_k(h_1)(1 - g_0^{m_1-2})^k; (7) \\
 p_{fr} &= s(h_1)(1 - a(h_1))b_1(h_1) + \\
 &+ s(h_2)a(h_1)(1 - g_1^{m_1-2})\sum_{k=1}^{K_A-1} b_k(h_1)kg_0^{m_1-2}(1 - g_0^{m_1-2})^{k-1} + \\
 &+ s(h_2)(1 - a(h_1))\sum_{k=2}^{K_A-1} b_k(h_1)kg_0^{m_1-2}(1 - g_0^{m_1-2})^{k-1}; (8) \\
 p_{pf} &= (1 - s(h_1)) + s(h_1)(1 - a(h_1))b_0(h_1) + \\
 &+ s(h_2)[a(h_2)(1 - b_0(h_2)) + (1 - a(h_2))(1 - b_0(h_2) - b_1(h_2))] + \\
 &+ s(h_1)(1 - g_1^2)[a(h_1)\sum_{k=1}^{K_A-1} b_k(h_1) + (1 - a(h_1))\sum_{k=2}^{K_A-1} b_k(h_1)] + \\
 &+ s(h_2)[a(h_1)(1 - g_1^{m_1-2})\sum_{k=1}^{K_A-1} b_k(h_1)(1 - g_0^{m_1-2})^k + \\
 &+ (1 - a(h_1))\sum_{k=2}^{K_A-1} b_k(h_1)(1 - g_0^{m_1-2})^k], (9)
 \end{aligned}$$

где $g_0 = r_{01}(h_2)/r_{01}(h_1)$, $g_1 = (1 - r_{10}(h_2))/(1 - r_{10}(h_1))$.

В диссертации показано, что формулы (4)–(6), а также формулы (7)–(9) образуют полную систему событий, т.е. $p_{cr} + p_{fr} + p_{pf} = 1$.

Полученные выше выражения для вероятностей исходов приёма (4)–(6) или (7)–(9) (в зависимости от возможных видов ошибок) представляют собой аналитическое описание математической модели ИК с применением защитного вторичного кода $K_{втор}$ с КСП, которое даёт возможность формульной оценки достоверности приёма ИК с использованием кода с КСП в условиях действия импульсных случайных помех большой интенсивности.

На рис. 6 приводятся результаты сравнения помехоустойчивости ИК без применения вторичного кода $K_{втор}$ с КСП, а также двух ИК с использованием вторичного кода $K_{втор}$ на основе КСП: только с ошибками трансформации и ИК общего вида. Переменным параметром является интенсивность импульсных случайных помех i_{pn} , варьирующаяся в диапазоне от 2.4 до 24, что эквивалентно изменению отношения сигнал/шум в диапазоне от 10 до 1, соответственно.

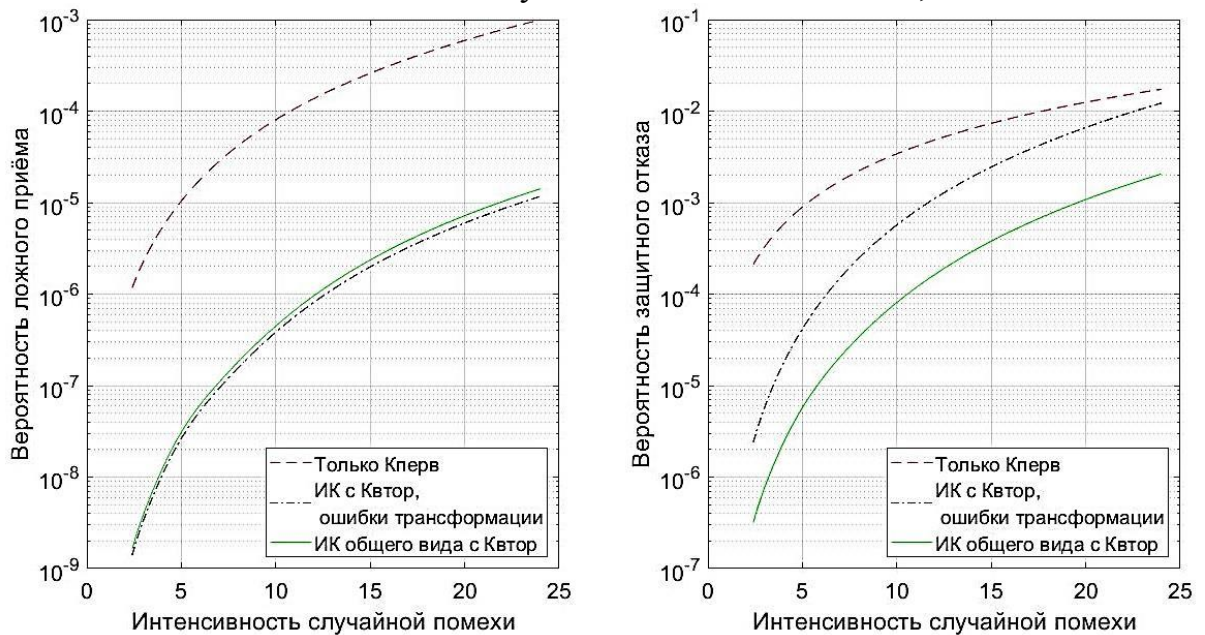


Рисунок 6 – Характеристики информационной надежности моделей ИК различных типов

Как следует из приведённых на рис. 6 характеристик, применение вторичного защитного кода на основе КСП снижает вероятности ложного приёма и защитного отказа и, как следствие, повышает информационную надёжность ИК в широком диапазоне значений интенсивности импульсных случайных помех.

Таким образом, предложенные во второй главе математическая модель кода с КСП, методы и алгоритмы его работы, а также аналитические зависимости вероятностей исходов приёма от статистических характеристик импульсных помех представляют собой результат, принципиально необходимый для разработки математических моделей каскадных ИК повышенной помехоустойчивости.

Третья глава работы посвящена синтезу разнотипных математических моделей ИК повышенной помехоустойчивости и вычислению вероятностей исходов приёма для полученных математических моделей на основе ниже излагаемого подхода.

Каждая модель ИК M_Φ синтезируется как последовательный набор моделей обобщённых каскадов кодирования-декодирования $M_\Phi = \{Z_{\Phi v}\}_{v \in [1..N_\Phi]}$. При этом к моделям обобщённых каскадов, помимо стандартных моделей первичного кода $K_{\text{перв}}$ и вторичного кода $K_{\text{втор}}$, также относится модель КС (с классической или альтернативной метрикой) и модель преобразования K -ичного первичного кода $K_{\text{перв}}$ в двоичный код с помощью $L = \lceil \log_2 K \rceil$ двоичных разрядов, позволяющая синтезировать всего два кодовых слова вторичного кода $K_{\text{втор}}$.

Т.к. физическая природа помех может быть разнообразной, статистические характеристики помех рассматриваются в обобщённом виде, а именно как тетрада вероятностей $p_g = (p_p, p_s, p_e, p_{se})$ ($0 \leq p_p, p_s, p_e, p_{se} \leq 1$, $p_p + p_s + p_e + p_{se} = 1$) атомарных воздействий одного импульса помехи, где:

- p_p – вероятность «сохраняющего» воздействия, т.е. не изменяющего символ исходного алфавита или символ стирания;
- p_s – вероятность «трансформирующего» воздействия, т.е. переводящего исходный алфавитный символ в некоторый другой алфавитный символ (в какой именно, зависит от метрики модели) или же переводящего символ стирания в символ 0;
- p_e – вероятность «стирающего» воздействия, т.е. переводящего алфавитный символ в «свой» (соответствующий) символ стирания и наоборот, символ стирания в «свой» алфавитный символ;
- p_{se} – вероятность «трансформирующе-стирающего» воздействия, переводящего алфавитный символ в «чужой» (несоответствующий) символ стирания.

Каждая модель обобщённого каскада выполняет преобразование входных обобщённых вероятностей p_g в выходные обобщённые вероятности p'_g . При этом типы воздействий остаются прежними: «сохраняющее», «трансформирующее», «стирающее» и «трансформирующе-стирающее». В диссертации выводятся формулы преобразования p_g в p'_g для моделей каскада каждого типа. Итоговые вероятности исходов приёма (p_{cr} , p_{fr} , p_{pf}) вычисляются как отдельные функции первого (внешнего) каскада. В диссертации показано, что, комбинируя различные обобщённые каскадные модели в допустимых вариантах, могут быть получены математические модели ИК повышенной помехоустойчивости различных типов.

При разработке реальных ИК важно выбрать математическую модель ИК, позволяющую наиболее эффективно решить конкретную задачу синтеза ИК, поэтому для обеспечения возможности сравнительной оценки используемых моделей ИК в работе введён многопараметрический относительный нормированный критерий эффективности, записываемый в виде:

$$\eta_{\phi} = \prod_{c=1}^{N_{\eta}} (\eta_{\phi c})^{\beta_c}, \quad (10)$$

где η_{ϕ} – коэффициент эффективности ϕ -й модели; c – вид критериального параметра; N_{η} – число используемых критериальных параметров разного вида; $\eta_{\phi c}$ – коэффициент эффективности ϕ -й модели по c -му критериальному параметру; β_c – весовой коэффициент (вес) по c -му критериальному параметру.

Рассматриваются три критериальных параметра с соответствующими параметрическими коэффициентами эффективности: параметр, характеризующий информационную надёжность ИК ($\eta_{\phi 1}$), параметр, отражающий скорость кода ($\eta_{\phi 2}$) и параметр, отражающий структурную сложность кодеков ($\eta_{\phi 3}$).

Коэффициент эффективности по первому критериальному параметру является основным. Он записывается как агрегата, не зависящая в явном виде от вероятности правильного приёма:

$$\eta_{\phi 1} = -\log \left[\max \left((p_{fr})_{\phi} + (p_{pf})_{\phi}^{\gamma}, 10^{-14} \right) \right] / -\log(10^{-14}),$$

где $\gamma \geq 0$ – весовой коэффициент вероятности защитного отказа. Коэффициент $\eta_{\phi 1}$ характеризует близость помехоустойчивости по значению вероятности трансформации (ложного приёма) сообщения-команды ϕ -й математической модели ИК к помехоустойчивости систем телеуправления первой категории (наивысшей категории по достоверности приёма) по ГОСТ 26.205-88.

В качестве второго критериального параметра взята скорость модели ИК, коэффициент эффективности $\eta_{\phi 2}$ по которому записывается в виде:

$$\eta_{\phi 2} = \prod_{v=1}^{N_{\phi}} V(Z_{\phi v}),$$

где $V(Z)$ – скорость модели обобщённого каскада Z , зависящая от типа каскада:

- КС не изменяет скорость, значит, $V(Z) = 1$;
- т.к. для кода с КСП выполняется неравенство $T_A < T_{op}$, то $V(Z) = 1$;
- каскад преобразования K -ичного кода в двоичный код имеет скорость $V(Z) = 1/L$;
- для корректирующего кода – $V(Z) = m_K/n_K$, где m_K – длина информационной части кода.

Предполагая, что сложность реализации моделей ИК на современной элементной базе примерно одинакова, в качестве третьего критериального параметра выбрана структурная сложность самой модели ИК, коэффициент эффективности $\eta_{\phi 3}$ по которому запишется как:

$$\eta_{\phi 3} = \sum_{v=1}^{N_{\phi}} \lambda(Z_{\phi v}),$$

где $\lambda(Z)$ – структурная сложность модели обобщённого каскада Z , зависящая от типа каскада и наличия ошибок стирания:

- для КС $\lambda(Z) = 1$;
- для кода с КСП $\lambda(Z) = n + 2$ при наличии ошибок стирания в ИК и $\lambda(Z) = n + 1$ при их отсутствии;
- для преобразования K -ичного кода в двоичный код $\lambda(Z) = 1$;
- для корректирующего кода $\lambda(Z) = e + 1$, т.к. исправление каждой ошибки стирания требует распараллеливания процесса декодирования, что увеличивает структурную сложность модели.

Таким образом, в данной главе изложен общий подход по синтезу разнотипных математических моделей ИК повышенной помехоустойчивости.

В четвёртой главе диссертации представлены результаты сравнения эффективности разнотипных математических моделей ИК на примере модели ИК для беспроводной системы передачи данных с датчиков давления летательного аппарата. С помощью разработанного программного комплекса численного моделирования каскадных K -ичных ИК вычисляется эффективность эталонной модели на основе предложенного критерия эффективности (10), а также исследуются возможности построения более эффективных модификаций данной модели за счёт варьирования количества каскадов кодирования-декодирования, использования различных метрик КС и режимов работы кодеков, а также применения защитного кода на основе КСП.

Сравнение проводится при следующих параметрах: $K_{\text{перв}}$ – троичный ($K = 3$, $\alpha = \{0,1,2\}$) с байтовой структурой ($n_K = 8$, $m_K = 4$). Такой первичный код $K_{\text{перв}}$ имеет минимальное кодовое расстояние $d_{\min} = 4$. При этом режимы работы кодеков различаются в зависимости от количества обнаруживаемых (r) и исправляемых ($s \leq r$) ошибок трансформации и исправляемых ошибок стирания (e) в пределах корректирующей способности первичного кода $K_{\text{перв}}$, определяемой неравенством $d_{\min} \geq r + s + e + 1$. Код на основе КСП – с весом кодовых слов $m_1 = 3$. Весовые коэффициенты $\beta_1 = 1.0$, $\beta_2 = 0.25$, $\beta_3 = -0.25$, $\gamma = 1.5$. Начальные обобщённые вероятности $p_p = 0.75$, $p_s = 0.1$, $p_e = 0.15$.

Для выбранных значений параметров наилучшие показатели эффективности при большой интенсивности импульсных случайных помех демонстрирует модель ИК с защитным кодированием вторичным кодом $K_{\text{втор}}$ с КСП и кодеком первичного кода $K_{\text{перв}}$ в комбинированном режиме ($s = r > 0$, $e > 0$).

На рис. 7 приведено сравнение помехоустойчивости традиционной модели ИК без использования защитного кодирования и помехоустойчивости указанной выше наилучшей модели с точки зрения критерия эффективности (10) в зависимости от интенсивности i_{pn} импульсных случайных помех.

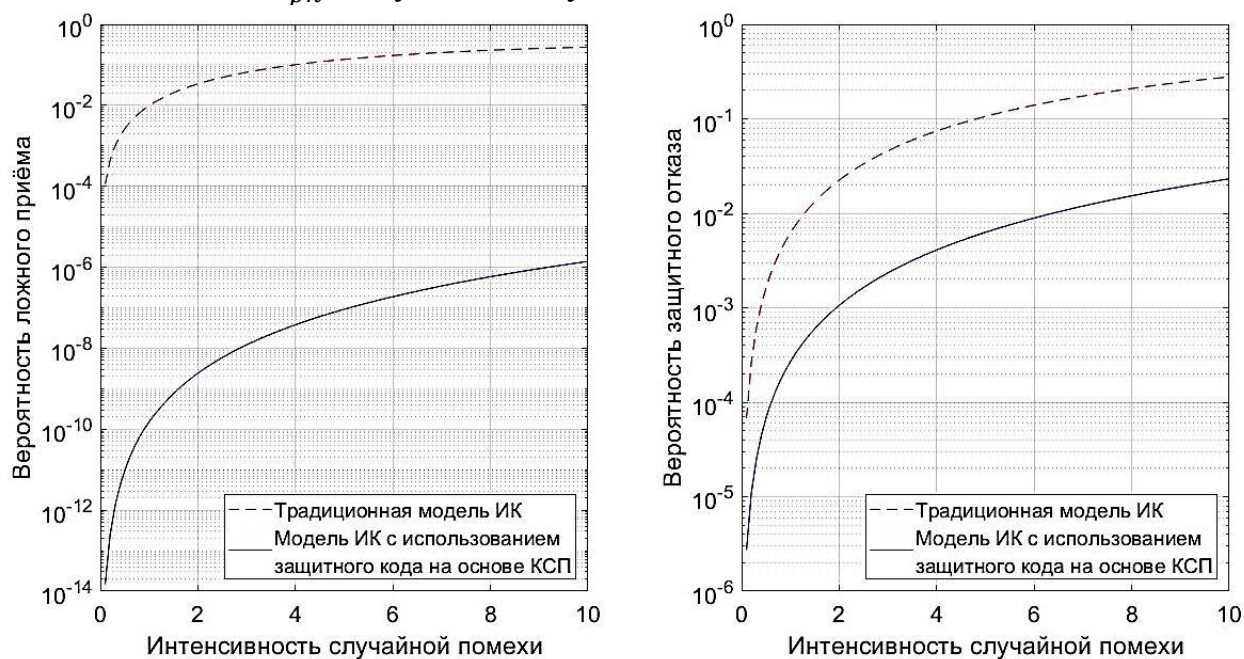


Рисунок 7 – Сравнение помехоустойчивости традиционной математической моделей ИК и модели ИК с использованием защитного кодирования вторичным кодом $K_{\text{втор}}$ на основе КСП.

Анализ приведённых данных показывает, что при большой интенсивности импульсных случайных помех применение защитного вторичного кода $K_{\text{втор}}$ на

основе КСП значительно снижает вероятности ложного приёма и защитного отказа и, как следствие, улучшает помехоустойчивость ИК.

Таким образом, задачи диссертационной работы выполнены, цель исследования достигнута.

В заключении сделаны основные выводы и приведены результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

При выполнении диссертационной работы получены следующие **результаты**:

1. Предложена математическая модель кода с КСП, отличающаяся от известных моделей возможностью замены передачи по КС элементов первичного корректирующего кода $K_{\text{перв}}$, не обладающего достаточной помехоустойчивостью, передачей серий импульсов малой длительности с фиксированными временными интервалами между ними, позволяющих парировать импульсные случайные помехи большой интенсивности.

2. Разработаны алгоритмы кодирования и декодирования для кода с КСП, отличающиеся гарантированным исправлением ошибок в ДКУ $_{\text{Кперв}}$ первичного кода в случае возникновения защитного отказа в ДКУ $_{\text{Квтор}}$ вторичного кода, что в условиях действия в КС импульсных случайных помех большой интенсивности позволяет уменьшить вероятность неправильного приёма не менее чем на два порядка.

3. Для ИК с использованием кода с КСП получены аналитические зависимости вероятностей исходов приёма от заданных статистических характеристик импульсных случайных помех в КС, применимые при действии случайных последовательностей импульсов помех с произвольными законами распределения амплитуд, что даёт возможность формульной оценки достоверности приёма в ИК с применением кода с КСП.

4. Разработаны математические модели каскадных K -ичных ИК, отличающиеся от существующих применением в последнем каскаде кодирования самосинхронизирующегося защитного кода с КСП, что в условиях действия в КС импульсных случайных помех большой интенсивности даёт возможность полностью исключить появление ошибок синхронизации кодека вторичного кода $K_{\text{втор}}$, снизить вероятность ошибок синхронизации кодека первичного кода $K_{\text{перв}}$ как минимум в пять раз и повысить информационную надёжность каскадных K -ичных ИК в среднем на 1–2%, что существенно при большом объёме передаваемой информации.

5. Разработан обобщённый сравнительный критерий эффективности моделей ИК, отличающийся от известных применимостью как к классическим моделям ИК, так и к моделям ИК с альтернативной метрикой и моделям с использованием кода на основе КСП, позволяющий проводить количественную сравнительную оценку моделей каскадных K -ичных ИК.

6. Разработан программный комплекс численного моделирования каскадных K -ичных ИК, в т.ч. с применением кода на основе КСП, дающий возможность синтеза и исследования моделей каскадных K -ичных ИК повышенной помехоустойчивости с надёжной синхронно-синфазной работой кодеков.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

Публикации в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК Минобрнауки РФ

1. Кленов, Д.В. Повышение помехоустойчивости недвоичных информационных каналов с помехами большой интенсивности / А.А. Львов, М.С. Светлов, Д.В. Кленов, М.К. Светлова // Радиотехника. – 2017. – № 7. – С. 136–139.

2. Кленов, Д.В. Анализ и оценка помехоустойчивости информационного канала с кодеком на базе кодового сигнального признака / А.А. Львов, М.С. Светлов, Д.В. Кленов, М.К. Светлова // Радиотехника. – 2018. – № 9. – С. 27–31. DOI: 10.18127/j00338486-201809-06.

3. Кленов, Д.В. Математическая модель информационного канала повышенной помехоустойчивости цифровых систем стандарта DVB-T2 / М.С. Светлов, А.А. Львов, Д.В. Кленов et. al. // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2018. – № 5. – С. 89–100. DOI: 10.23683/2311-3103-2018-5-89-100.

Публикации в изданиях, индексируемых в базе SCOPUS

4. Klenov, D.V. Increasing of information reliability of digital communication channels under conditions of high intensity noise / A.A. L'vov, D.V. Klenov, A.A. Sytnik, et. al. // Dynamics of systems, mechanisms and machines (Dynamics-2016): Proceedings of the X International Scientific and Technical Conference. – Omsk, 2016. IEEE Catalog Number: CFP16RAB-CDR. DOI: 10.1109/Dynamics.2016.7819025.

5. Klenov, D.V. Algorithms of coding and decoding for code with code signal feature / M.S. Svetlov, O.N. Dolinina, A.A. L'vov, D.V. Klenov // Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus-2017): Proc. 2017 IEEE Conference. – St. Petersburg, 2017. – P. 748–752. DOI: 10.1109/EIConRus.2017.7910666.

6. Klenov, D.V. Self-synchronized encoding and decoding algorithms based on code signal feature / M.S. Svetlov, O.N. Dolinina, A.A. L'vov, D.V. Klenov // Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA-2017): Proc. 27th International Conference. – Brno, Czech Republic, 2017. – P. 1–5. DOI: 10.1109/RADIOELEK.2017.7936641.

7. Klenov, D.V. Noise immunity improvement of DVB-T2 digital data transmission systems / M.S. Svetlov, A.A. L'vov, D.V. Klenov, et. al. // Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus-2018): Proc. 2018 IEEE Conference. – St. Petersburg, 2018. – P. 1162–1166. DOI: 10.1109/EIConRus.2018.8317297.

8. Klenov, D.V. Radar-based wireless sensor network for distributed measurement systems / A.A. L'vov, D.V. Klenov, S.A. Kuzin, M.S. Svetlov, P.A. L'vov // 2018 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO): Conference Proceedings, Minsk, Belarus, 2018. – P. 1–6. DOI: 10.1109/SYNCHROINFO.2018.8457040.

9. Klenov, D.V. Synchronization techniques for the information channel with codec based on code signal feature / M.S. Svetlov, D.V. Klenov, A.A. L'vov, M.K. Svetlova // 2018 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO): Conference Proceedings. – Minsk, Belarus, 2018. – P. 1–4. DOI: 10.1109/SYNCHROINFO.2018.8457052.

10. Klenov, D.V. Information channel synthesis for remote test monitoring / M.S. Svetlov, A.A. L'vov, D.V. Klenov, et. al. // Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE-2018): Proc. International Conference. – Saratov, 2018. – P. 101–104. DOI: 10.1109/APEDE.2018.8542266.

11. Klenov, D.V. Synthesis of the information channel with codec based on code signal feature / D.V. Klenov, M.S. Svetlov, A.A. L'vov, et. al. // Information and Communication Technologies for Industry and Research (ICIT-2019): Proc. International Conference. – Saratov, 2019. – P. 199–214. DOI: 10.1007/978-3-030-12072-6_18.

Публикации в других изданиях

12. Кленов, Д.В. Метод исключения защитных интервалов в цифровых системах передачи информации с COFDM / М.С. Светлов, А.А. Львов, О.М. Балабан, Д.В. Кленов, М.К. Светлова // Перспективные информационные технологии (ПИТ-2017): труды Международной научно-технической конференции. – Самара, 2017. – С. 989–991.

13. Кленов, Д.В. Некоторые свойства кода на основе кодового сигнального признака / М.С. Светлов, А.А. Львов, Д.В. Кленов, О.М. Балабан // Перспективные информационные технологии (ПИТ-2017): труды Международной научно-технической конференции. – Самара, 2017. – С. 992–995.

14. Кленов, Д.В. Влияние интервального условия на помехоустойчивость информационного канала / М.С. Светлов, А.А. Львов, Д.В. Кленов // Информационно-коммуникационные технологии в науке, образовании и производстве (ICIT-2017): материалы Междунар. науч.-практ. конф. – Саратов, 2017. – С. 144–150.

15. Кленов, Д.В. Распределенная система датчиков для управления на основе беспроводного радиоканала связи / Д.В. Кленов, А.А. Львов, П.А. Львов и др. // Системный синтез и прикладная синергетика (ССПС-2017): материалы VIII Всероссийской научной конференции. – пос. Нижний Архыз, 2017. – С. 306–313.
16. Кленов, Д.В. Информационный канал повышенной помехоустойчивости в распределенных беспроводных бортовых системах / Д.В. Кленов, А.А. Львов, П.А. Львов и др. // Системный синтез и прикладная синергетика (ССПС-2017): материалы VIII Всероссийской научной конференции. – пос. Нижний Архыз, 2017. – С. 314–321.
17. Кленов, Д.В. Математическая модель информационного канала с кодеком на базе кодового сигнального признака / Д.В. Кленов, А.А. Львов, П.А. Львов и др. // Системный синтез и прикладная синергетика (ССПС-2017): материалы VIII Всерос. науч. конф. – пос. Нижний Архыз, 2017. – С. 322–330.
18. Кленов, Д.В. Оптимизация параметров вторичного кода с кодовым сигнальным признаком в каналах с заданной статистикой / М.С. Светлов, А.А. Львов, Д.В. Кленов, Н.И. Мельникова // Проблемы управления, обработки и передачи информации (УОПИ-2017): материалы V Международной юбилейной научной конференции. – Саратов, 2017. – С. 182–188.
19. Кленов, Д.В. Алгоритмы кодирования и декодирования для кода на основе кодового сигнального признака в информационных каналах со стиранием / М.С. Светлов, А.А. Львов, Д.В. Кленов, Н.С. Вагарина // Перспективные информационные технологии (ПИТ-2018): труды Международной научно-технической конференции. – Самара, 2018. – С. 1100–1105.
20. Кленов, Д.В. Математическая модель информационного канала общего вида с кодеком на базе кодового сигнального признака / М.С. Светлов, А.А. Львов, Д.В. Кленов и др. // Компьютерные науки и информационные технологии (КНиИТ-2018): труды VIII Международной научной конференции памяти А.М. Богомолова. – Саратов, 2018. – С. 346–350.
21. Кленов, Д.В. Многопараметрический критерий эффективности для моделей информационного канала с кодеком на базе кодового сигнального признака / Д.В. Кленов // Проблемы управления, обработки и передачи информации (УОПИ-2018): материалы VI Международной научной конференции. – Саратов, 2018. – С. 175–179.
22. Кленов, Д.В. Оценка достоверности приёмопередачи для моделей информационных каналов повышенной помехоустойчивости / Д.В. Кленов, А.А. Львов, П.А. Львов и др. // Системный синтез и прикладная синергетика (ССПС-2019): материалы IX Всерос. науч. конф. – Нижний Архыз, 2019. – С. 265–274.

Свидетельства

1. Синтез кодовых слов без циклических сдвигов для кода на основе кодового сигнального признака: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017614957 Рос. Федерация / Д.В. Кленов, А.А. Львов, М.С. Светлов; правообладатель: СГТУ имени Гагарина Ю.А. – № 2017611925; заявл. 10.03.2017; опубл. 02.05.2017.
2. Синтез кодовых слов без повторяющихся интервалов для кода на основе кодового сигнального признака: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017662994 Рос. Федерация / Д.В. Кленов, А.А. Львов, М.С. Светлов; правообладатель СГТУ имени Гагарина Ю.А. – № 2017611918; заявл. 10.03.2017; опубл. 23.11.2017.
3. Моделирование информационного канала с кодеком на базе кодового сигнального признака: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019661426 Рос. Федерация / Д.В. Кленов, А.А. Львов, М.С. Светлов, П.А. Львов; правообладатели: Д.В. Кленов, А.А. Львов, М.С. Светлов, П.А. Львов. – № 2019660339; заявл. 16.08.2019; опубл. 28.08.2019, Бюл. № 9.

Подписано в печать 27.03.2020

Бум. офсет.

Тираж 100 экз.

Усл. печ. л. 1,0

Заказ 14

Формат 60×84 1/16

Уч.-изд. л. 1,0

Бесплатно

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

410054 г. Саратов, ул. Политехническая, 77

Отпечатано в Издательстве СГТУ. 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77

Тел.: 8 (8452) 99-87-39, e-mail: izdat@sstu.ru