

## АНАЛИЗ ДОСТОВЕРНОСТИ ПЕРЕДАЧИ МЕЖДУ УСТРОЙСТВАМИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПРИ ПАКЕТИРОВАНИИ ОШИБОК

Фрейман В. И. – д-р техн. наук, профессор кафедры «Автоматика и телемеханика», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Россия.

### АННОТАЦИЯ

**Актуальность.** Проведен анализ показателей достоверности передачи информации между элементами систем управления с учетом пакетирования (группирования) ошибок в канале связи. Объектом исследования являются характеристики и параметры помехоустойчивых циклических двоичных и недвоичных кодов, ориентированных на исправление пакетов ошибок. Предмет исследования – теоретический и экспериментальный сравнительный анализ показателей достоверности кодов, исправляющих пакеты ошибок.

**Цель работы** – определение аналитических зависимостей показателей достоверности выбранных избыточных кодов от их параметров и свойств канала связи, разработка моделей для их экспериментального исследования, формирование рекомендаций по выбору кодов с заданными характеристиками при определенных свойствах и модели описания ошибок.

**Методы.** Использован математический аппарат и теория построения помехоустойчивых циклических двоичных (БЧХ) и недвоичных (Рида-Соломона) кодов. Получены аналитические соотношения для определения показателей достоверности передачи с учетом возможных искажений символов кода внутри пакета ошибок. Исследованы зависимости корректирующих свойств и вероятности правильной передачи от параметров кода и ошибки, приведены иллюстрирующие примеры. Разработаны имитационные схемотехнические модели системы управления с исследуемыми способами помехоустойчивого кодирования. Проведены экспериментальные исследования, на основании полученных данных сделаны выводы и предложены рекомендации по выбору параметров кодов для заданных показателей достоверности для обеспечения максимальной эффективности (информационной скорости передачи).

**Результаты.** Получены зависимости показателей достоверности (вероятность правильной передачи) и корректирующих свойств (длина исправляемого пакета ошибок) исследуемых избыточных кодов от их параметров (количества избыточных символов, степени перемежения – для БЧХ-кодов; модуль поля Галуа, кратность исправляемых ошибок – для кодов Рида-Соломона). Даны рекомендации по использованию полученных результатов при выборе параметров кода. Для проведения экспериментальных исследований созданы и настроены модели системы управления в среде MathWorks MatLab Simulink.

**Выводы.** Проведенные в работе исследования позволяют рассчитать и обоснованно выбрать параметры избыточных кодов для заданных показателей достоверности с учетом модели поведения ошибок в канале передачи. Это дает возможность проектировать и реализовать надежные системы управления с заданными показателями достоверности и максимальной информационной скоростью передачи.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** информационно-управляющие системы, достоверность, помехоустойчивость, избыточность, циклические коды, пакет ошибок, модель.

### АББРЕВИАТУРЫ

GF – Galua Field;  
IoT – Internet of things;  
IPTV – Internet Protocol Television;  
PLC – Programmable Logical Controller;  
VoIP – Voice over Internet;  
Wi-Fi – Wireless Fidelity;  
АСУП – Автоматизированная система управления предприятием;  
АСУТП – Автоматизированная система управления технологическими процессами;  
БЧХ – Боуз, Чоудхури, Хоквингем;  
Р-С – Рида-Соломона;  
РИУС – распределенные информационно-управляющие системы;  
ПЛИС – программируемые логические интегральные схемы.

### НОМЕНКЛАТУРА

$\alpha$  – переменная для описания структуры символа;  
 $\Delta$  – приращение;  
 $b$  – длина пакета исправляемых ошибок;  
 $b^*$  – количество ошибочных бит в пакете ошибок;  
 $b_{\max_p}$  – максимальная потенциальная длина исправляемого пакета ошибок;

$b_{\max_g}$  – максимальная гарантированная ( $\max_g$ ) длина исправляемого пакета ошибок;  
 $d$  – минимальное кодовое расстояние Хэмминга;  
 $e$  – полином ошибки;  
 $f$  – неприводимый и примитивный полином;  
 $g$  – порождающий полином кода;  
 $h$  – параметр БЧХ-кода;  
 $k$  – длина избыточной части сообщения;  
 $k^*$  – длина избыточной части исходного БЧХ-кода;  
 $l$  – количество бит в символе;  
 $m$  – длина информационной части сообщения;  
 $n$  – общая длина сообщения;  
 $N_1$  – число полных пакетов ошибок;  
 $N_0$  – число неполных пакетов ошибок;  
 $p$  – вероятность ошибочного приема бита;  
 $P_{\text{пр}}$  – вероятность правильной передачи сообщения;  
 $\tilde{P}_{\text{пр}}$  – заданная вероятность правильной передачи;  
 $P_c$  – вероятность ошибочного символа кода;  
 $P_{\text{тр}}$  – вероятность трансформации сообщения;  
 $R$  – информационная скорость передачи;  
 $s$  – кратность исправляемых ошибок;  
 $t$  – степень укорочения кода;  
 $u$  – информационный полином кода;

$V$  – передаваемый полином кода;  
 $V'$  – принимаемый полином кода;  
 $x$  – формальная переменная для описания кода;  
XOR – логическая операция «Исключающее ИЛИ».

## ВВЕДЕНИЕ

Системы передачи и хранения информации являются важной частью структур систем управления различными объектами и процессами (АСУТП, АСУП, РИУС), а также могут выступать как самостоятельная функциональная система (телекоммуникации – Wi-Fi, Bluetooth, IoT, IPTV, VoIP и т.д.). Одной из их основных эксплуатационно-технических характеристик является достоверность передачи. Она определяется физическими характеристиками источников помех, адекватностью математического описания их поведения, а также корректностью выбранных способов помехоустойчивого кодирования [1].

Из-за распространения коммуникационных технологий (спутниковая связь, беспроводные технологии, кабельные системы и т.п.) устройствам систем управления приходится работать в условиях действия совокупности помех, которые характеризуются малыми соотношениями «сигнал/шум», высокой вероятностью битовых ошибок и т.д. Существенно снижает достоверность пакетирования ошибок, при котором поражаются целые группы символов (от единиц до нескольких сотен) [2]. Поэтому нужны эффективные способы коррекции таких ошибок, при этом необходимо учитывать внесение значительной избыточности и соответствующее снижение пропускной способности и быстродействия. Следовательно, нужно уметь оценить характеристики кодов и выбрать их параметры, гарантирующие требуемую достоверность при максимальной информационной эффективности (минимальной избыточности), задержке, вычислительной сложности реализации алгоритмов кодирования/декодирования и т.д.

**Объектом исследования** выбраны помехоустойчивые циклические двоичные (БЧХ) и недвоичные (Р-С) избыточные коды, их свойства и параметры.

**Предметом исследования** является теоретический и экспериментальный сравнительный анализ показателей достоверности выбранных избыточных кодов при пакетировании ошибок при передаче данных по каналам систем управления.

**Цель работы** – сравнительный анализ характеристик избыточных кодов, корректирующих пакеты ошибок. На основании анализа предлагаются рекомендации по применению кодов с заданными характеристиками при определенных свойствах и модели описания ошибок при передаче.

## 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Корректирующие коды описываются взаимопроверяющимися друг другу характеристиками: достоверностью и эффективностью. За каждый дополнительный бит, улучшающий корректирующие свойства

кода и повышающий показатели достоверности, приходится «расплачиваться» снижением быстродействия, увеличением ресурсов, усложнением алгоритмов обработки. Поэтому важно подобрать такие параметры кодов, которые обеспечивают выполнение требований по достоверности при максимальной эффективности [3]. При этом существенным фактором становится адекватная оценка модели поведения помех, которые могут быть описаны как «независимые» или как «пакетирующиеся» («группирующиеся»), что является при тестировании канала передачи [4].

Для коррекции пакетов ошибок разработаны и эффективно применяются двоичные циклические коды, построенные по принципу перемежения, или специальные коды (Файра, Бартона и др.) [5]. Но способы построения, эффективность (избыточность) и алгоритмы декодирования циклических кодов, исправляющих независимые и пакетирующиеся ошибки, существенно отличаются. Поэтому были разработаны и предложены для широкого применения недвоичные циклические коды Рида-Соломона [6]. Особенностью их применения является то, что способы построения и алгоритмы декодирования инварианты к модели ошибок.

Для решения проблемы выбора кода с заданными показателями достоверности при максимальной эффективности выполним математическую постановку задачи.

Пусть имеется совокупность параметров избыточных двоичных и недвоичных кодов, характеризующих их свойства. Общие параметры: длина –  $m, k, n, t$ ; корректирующие свойства –  $s, b$ , а также характеристика канала связи  $p$ . Дополнительные параметры: для БЧХ-кодов –  $i$ , для кодов Р-С –  $l$ . Они задают два основных критерия оценки кодов – достоверность, оцениваемая через  $P_{пр.}$ , и эффективность (информационная скорость), оцениваемая через  $R$ . Каждый из указанных критериев представляет собой функциональную зависимость от параметров кода и среды передачи:

$$P_{пр.} = f(n, b, p); R = f(m, n) = f(k, n); P_{пр.} \sim \frac{1}{R}. \quad (1)$$

Для решения задач синтеза системы управления с заданными показателями достоверности необходимо исследовать зависимости введенных критериев от параметров кода при максимально возможной эффективности (информационной скорости передачи):

$$P_{пр.} > \tilde{P}_{пр.}; R \rightarrow \max. \quad (2)$$

Достоверность характеризуется вероятностью правильной передачи сообщения при наличии информации о свойствах (вероятность появления) и характеристиках (степень группирования) ошибок. Эффективность задается коэффициентом полезного использования пропускной способности канала, при этом актуальной задачей является ее максимизация (минимизация символьной избыточности) при соблюдении заданной достоверности. Поэтому далее решаются вопросы по определению и исследованию зависимо-

стей показателей достоверности и эффективности от параметров кода и свойств среды передачи. Это дает возможность выбрать и реализовать в элементах систем управления способы обеспечения заданной достоверности при максимальной информационной скорости передачи.

## 2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Первоначально для исправления пакетов ошибок использовались двоичные циклические коды (БЧХ-коды) [7]. Они строились двумя способами [1]:

- 1) перемежением со степенью перемежения  $i$ ;
- 2) применением специальных кодов (Файра, Бартона и т.д.).

К их достоинствам можно отнести хорошую проработанность алгоритмов кодирования и декодирования, а также относительную простоту их аппаратной и программной реализации. Недостатком является отличие алгоритмов декодирования и структур декодеров для разного характера поведения ошибок в канале (независимые или пакетизирующиеся), что требует дополнительного анализа и регулярного тестирования канала передачи [8].

Открытие не двоичных циклических кодов (Ирвин Рид и Густав Соломон – R-C [9]), появление эффективных алгоритмов декодирования и аппаратно-программной реализации способствовало их эффективному применению в информационных системах. К определенным недостаткам указанных способов кодирования можно отнести сложность их математического описания и алгоритмов декодирования. Это компенсируется их высокой эффективностью (достоверностью), а также инвариантностью к характеру поведения помех в канале (способы декодирования независимых и пакетизирующихся ошибок одинаковые). Необходимо отметить, что широкое распространение систем передачи информации (промышленные информационно-управляющие системы, системы управления предприятиями, телекоммуникации, системы хранения и обработки данных и т.д.) происходит с учетом существенного снижения достоверности передачи на уровне символов [10]. Это требует более эффективного применения способов и алгоритмов декодирования при сохранении сравнительно низкой избыточности при использовании ресурсов системы.

Теория построения, кодирования и декодирования кодов, исправляющих пакеты ошибок, достаточно подробно представлена в научных публикациях зарубежных и отечественных исследователей [2, 5, 8, 11, 12]. Однако для их анализ показал необходимость исследования получения и исследования зависимостей показателей достоверности и эффективности кодирования с учетом способов их построения. Поэтому далее будут представлены результаты анализа характеристик достоверности и эффективности кодов при пакетировании ошибок. Также построены модели систем передачи и даны практические рекомендации по выбору соответствующих параметров для реализа-

ции процедур кодирования и декодирования в современном аппаратно-программном базисе.

## 3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Перед изложением способов и алгоритмов кодирования и декодирования определим термин «пакет ошибок» [4]. Будем считать, что пакет имеет длину  $b$  бит, начинается и заканчивается ошибочным битом, а внутри может содержать и ошибочные, и правильно принятые биты. Таким образом, количество искаженных бит в пакете находится в интервале  $[2; b]$ , если считать, что искаженных бит в пакете может быть не меньше 2. В работе [1] проиллюстрированы способы определения длины пакета в зависимости от выбранной модели ошибок (Гильберта, Гильберта-Элиота, Пуртова и т.д.).

Рассмотрим краткую теорию построения и применения двоичных циклических кодов для исправления пакетов ошибок. Из границы Рейгера можно определить зависимость длины исправляемого пакета ошибок от количества избыточных символов, представленных через его параметры:

$$b \leq \frac{k}{2} = \frac{i \cdot k^*}{2} = \frac{i \cdot s \cdot h}{2}. \quad (3)$$

Для построения кода используется порождающий полином  $g(x^i)$ . Структурные схемы и алгоритмы кодирования и декодирования подробно рассмотрены в работе [1].

Исследуем зависимости характеристики  $b$  от параметров кода  $i$  и  $k^*$  и представим их на рис. 1 и 2.

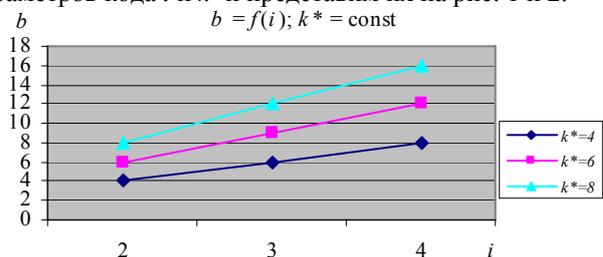


Рисунок 1 – Зависимость длины исправляемого пакета ошибок от степени перемежения

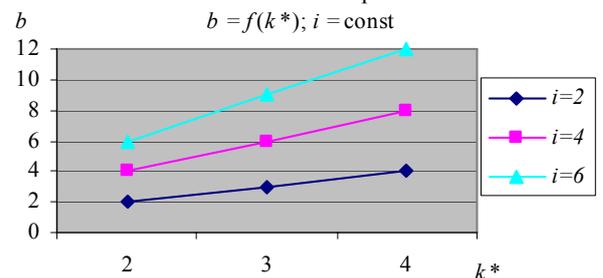


Рисунок 2 – Зависимость длины исправляемого пакета ошибок от числа избыточных символов кода

Выводы по рис. 1 и 2: с увеличением значений параметров кода длина исправляемого пакета ошибок растет линейно. Скорость изменения характеристики  $b$  по каждому из параметров определяется соответствующей частной производной, не зависит от данного

параметра и определяется значениями остальных параметров:

$$\frac{\partial b}{\partial i} = \frac{k^*}{2}; \frac{\partial b}{\partial k^*} = \frac{i}{2}. \quad (4)$$

Для оценки вероятности правильной передачи, характеризующей достоверность, сначала нужно определить варианты пакетов ошибок заданной длины  $b^* \in [1; b]$ . Будем считать пакет ошибок длины  $b^*$  комбинацией двоичных символов, крайние значения которой равны 1, а между ними могут быть разные сочетания. Тогда число таких сочетаний равно:

$$\sum_{j=0}^{b^*-2} \binom{b^*-2}{j}. \quad (5)$$

Количество исправляемых пакетов ошибок кратности  $b^* \in [1; b]$  определяется так:

$$\sum_{i=1}^b \sum_{j=0}^{i-2} \binom{i-2}{j}. \quad (6)$$

Для кода длины  $n$  таких пакетов будет:

$$n - b^* + 1. \quad (7)$$

Чтобы не делать дополнение для крайних  $(b - 1)$  символов, используем следующую декомпозицию: отдельно будем рассчитывать  $N_1$  (пакеты, в которых искажаются все символы фрагмента сообщения) и  $N_0$  (пакеты, в которых искажаются не все символы фрагмента сообщения):

$$N_1 = \sum_{i=1}^b (n - i + 1); N_0 = \sum_{i=3}^b (n - i + 1) \sum_{j=0}^{i-3} \binom{i-2}{j}. \quad (8)$$

С учетом биномиального распределения ошибок запишем выражение для вероятности правильной передачи:

$$P_{\text{пр.}} = (1 - p)^n + \sum_{i=1}^b (n - i + 1) p^i (1 - p)^{n-i} + \sum_{i=3}^b (n - i + 1) \sum_{j=0}^{i-3} \binom{i-2}{j} p^i (1 - p)^{n-i}. \quad (9)$$

Оценим и построим зависимости показателя вероятности правильной передачи от параметров кода и характеристик помехи в канале связи (рис. 3, 4).

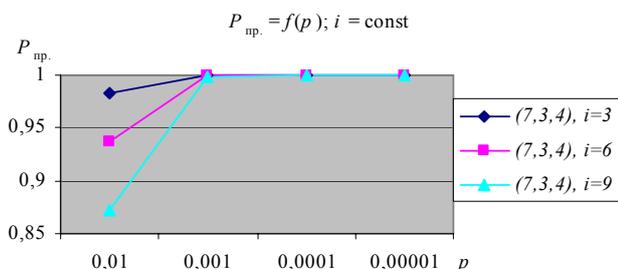


Рисунок 3 – Зависимость показателей достоверности от свойств помехи в канале

Вывод по рис. 3: при низких значениях  $p$ , что соответствует сильно «зашумленным» каналам (РИУС, Wi-Fi и т.п.) высокая достоверность достигается при низкой эффективности кода (за счет существенной избыточности). В «хороших» каналах связи заданной достоверности можно добиться при высокой эффективности (низкой избыточности).

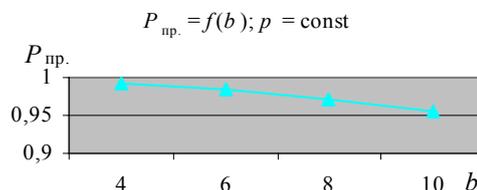


Рисунок 4 – Зависимость показателей достоверности от характеристик поведения ошибки в канале

Вывод по рис. 4: с увеличением длины исправляемого пакета ошибок достоверность снижается за увеличения избыточности. Причем динамика изменения скорости уменьшения достоверности нелинейная – скорость увеличивается.

Рассмотрим краткую теорию построения кодов Р-С [6]. Коды Р-С представляют собой недвоичные циклические коды, построенные над полем Галуа  $GF(2^l)$ , символы которых строятся путем объединения нескольких ( $l$ ) бит, описываются полиномом по формальной переменной  $\alpha$  и по модулю неприводимого и примитивного полинома  $f(\alpha)$  степени  $l$ . Полином кода длины  $n$  строится из недвоичных символов как коэффициентов по формальной переменной  $x$ .

Коды Р-С относятся к блочным кодам и описываются  $(n, m, d)$ -формой представления. Их характеристики вычисляются по следующим расчетным соотношениям:

$$d = 2s + 1; k = 2s; n = 2^l - 1; m = n - k = 2^l - 1 - 2s. \quad (10)$$

В соответствии с правилами задания кода Р-С, он может быть укорочен на  $t$  символов за счет приравнивания к 0 соответствующего количества старших символов табличного значения информационной части или удлиннен, но не более чем на 2 символа [9].

Для описания действий над полиномами кода строятся таблицы представления, сложения и умножения. Для процедур кодирования и декодирования строится порождающий полином  $g(x)$ .

Процедура кодирования для кодов Р-С как подкласса циклических кодов основывается на делении информационного полинома  $u(x)$ , домноженного на  $x^k$ , на порождающий полином  $g(x)$  [6].

Процедура декодирования кодов Р-С содержит три основных этапа: вычисление синдрома, определение места ошибок при помощи полинома локатора ошибки и расчет значений ошибки [3]. После этого вычисленный полином ошибки  $e(x)$  складывается с помощью операции XOR с принятым полином  $V'(x)$ , и ошибки исправляются.

Проанализируем корректирующие свойства кодов Р-С, направленные на исправление пакетов ошибок.

Очевидно, что коды Р-С, исправляющие однократную ошибку, не могут гарантировано исправлять пакеты ошибок заданной длины  $b$  (даже для  $b = 2$  есть вероятность расположения пакета ошибок на два соседних символа кода Р-С, значит, нужно исправление как минимум двух символьных ошибок). Оценим максимальную потенциальную ( $\max_p$ ) и максимальную гарантированную ( $\max_g$ ) длины исправляемых пакетов ошибок (без доказательства, оно может быть сделано путем математической индукции – от заданных малых значений к обобщению, а также графически):

$$b_{\max_p} = l \cdot s; b_{\max_g} = b = l \cdot (s - 1) + 1. \quad (11)$$

Проанализируем зависимости длины исправляемого пакета ошибок от параметров кода (рис. 5 и 6).

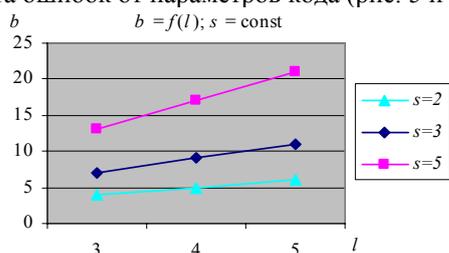


Рисунок 5 – Зависимость длины исправляемого пакета ошибок от параметра кода  $l$

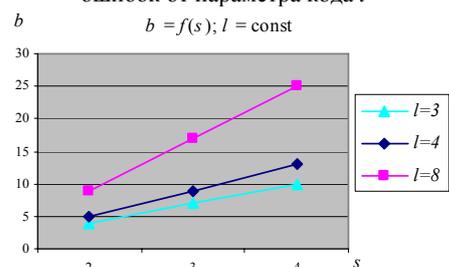


Рисунок 6 – Зависимость длины исправляемого пакета ошибок от параметра кода  $s$

Выводы по рис. 5 и 6: длина исправляемого пакета ошибок линейно зависит от параметров кода и растет тем быстрее, чем лучше корректирующие свойства.

Скорость изменения параметра  $b$  по каждому из параметров определяется соответствующей частной производной, не зависит от данного параметра и определяется значением другого параметра:

$$\frac{\partial b}{\partial l} = s - 1; \frac{\partial b}{\partial s} = l. \quad (12)$$

Для того чтобы оценить, как влияет изменение каждого из параметров на длину исправляемого пакета ошибок  $b$ , рассчитаем частные и полное приращения:

$$\begin{aligned} \Delta_l b &= \frac{\partial b}{\partial l} \Delta l = (s - 1) \Delta l; \Delta_s b = \frac{\partial b}{\partial s} \Delta s = l \Delta s; \\ \Delta b &\neq \Delta_l b + \Delta_s b; \\ \Delta b &= b(l + \Delta l; s + \Delta s) - b(l; s) = \\ &= [(l + \Delta l)(s + \Delta s - 1) + 1] - \\ &- [l(s - 1) + 1] = (s - 1) \Delta l + (l + \Delta l) \Delta s. \end{aligned} \quad (13)$$

Пример 1. Пусть дан код Р-С со следующими параметрами:  $l = s = 3$ . Зададим для каждого параметра единичное приращение:  $\Delta l = \Delta s = 1$  и определим новые значения длины пакета исправляемых ошибок:

$$l = s = 3: b = l(s - 1) + 1 = 3(3 - 1) + 1 = 7;$$

$$l = s = 4: \Delta_l b = \frac{\partial b}{\partial l} \Delta l = (s - 1) \Delta l = 2; b = b + \Delta_l b = 7 + 2 = 9;$$

$$\Delta_s b = \frac{\partial b}{\partial s} \Delta s = l \Delta s = 3; b = b + \Delta_s b = 7 + 3 = 10;$$

$$\Delta b = (s - 1) \Delta l + (l + \Delta l) \Delta s = (3 - 1) \cdot 1 + (3 + 1) \cdot 1 = 2 + 4 = 6;$$

$$b = b + \Delta b = 7 + 6 = 13.$$

Для оценки вероятности правильной передачи и трансформации сообщения можно использовать формулу, учитывающую биномиальное распределение ошибок в канале связи:

$$P_{\text{пр.}} = \sum_{i=0}^s \binom{n}{i} \cdot P_c^i \cdot (1 - P_c)^{n-i}; P_{\text{тр.}} = 1 - P_{\text{пр.}} \quad (14)$$

$$P_c = 1 - (1 - p)^l. \quad (15)$$

Поэтому выражение (14) можно представить так:

$$P_{\text{пр.}} = \sum_{i=0}^s \binom{n}{i} \cdot [1 - (1 - p)^l]^i \cdot (1 - p)^{l \cdot (n-i)}; P_{\text{тр.}} = 1 - P_{\text{пр.}} \quad (16)$$

Оценим зависимость показателей достоверности от длины исправляемого пакета ошибок (рис. 7) для кодов Р-С со следующими характеристиками:  $l = 8$ ;  $p = 10^{-3}$ ;  $t = \{100; 200\}$ ;  $s = \{2: b = 9; 3: b = 17; 4: b = 25\}$ .

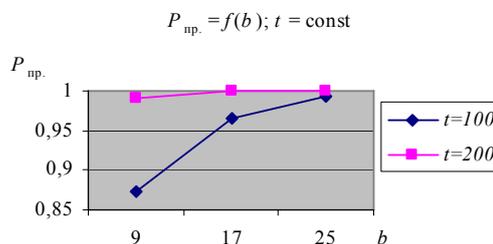


Рисунок 7 – Зависимость показателей достоверности от длины исправляемого пакета ошибок

Вывод по рис. 7: чем короче код, тем лучше показатели достоверности при тех же показателях группирования ошибок в канале передачи.

#### 4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для проведения экспериментов были разработаны модели систем управления в среде MathWorks MatLab, пакет расширения Simulink [13] – с применением двоичного циклического кодирования (рис. 8) и кодов Р-С (рис. 9).

Построенные модели позволяют исследовать показатели достоверности в зависимости от свойств среды передачи отношения «сигнал/шум» – рис. 10, а, б.

Model of Communication Channel With Cyclic Redundancy Check

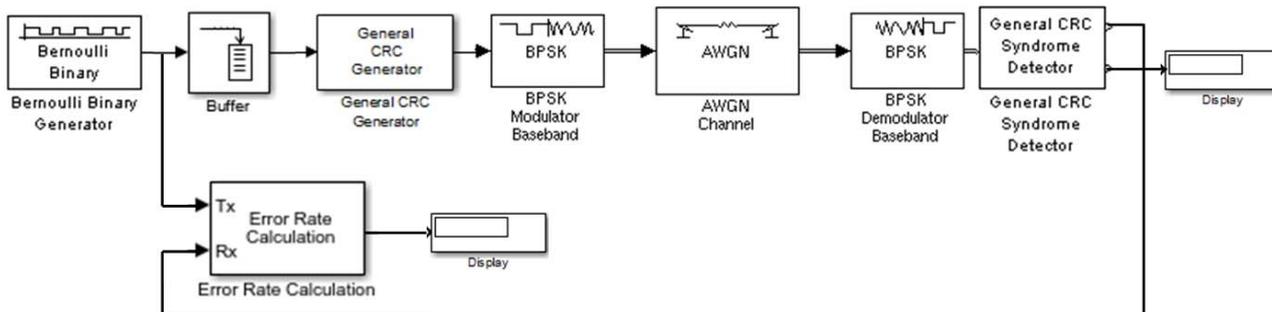


Рисунок 8 – Схематехническая модель системи управління з двоичним циклічним кодуванням

Model of Communication Channel With Reed-Solomon Coding

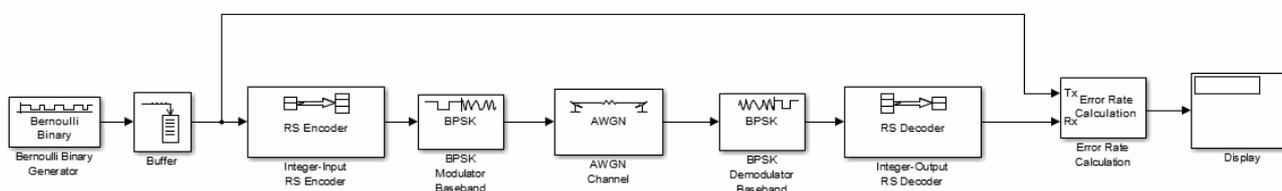


Рисунок 9 – Схематехническая модель системи управління з недвоичним кодуванням Р-С

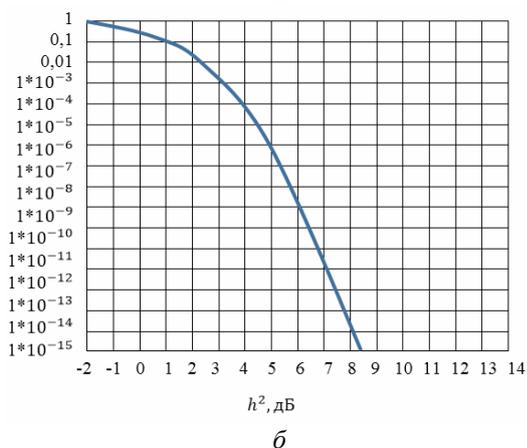
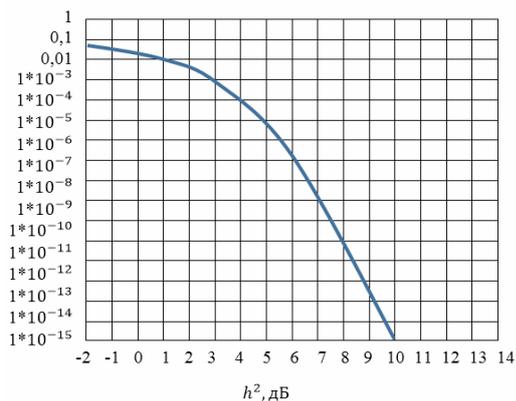


Рисунок 10 – Зависимость вероятности ошибки для БЧХ-кодов (а) и кодов Р-С (б)

Проведенные эксперименты показали, что коды Р-С эффективнее БЧХ, поскольку имеют большую достоверность при меньшей избыточности.

Эксперимент 1.

Р-С:  $(7, 3, 5) \rightarrow (21, 9); l = 3; s = 2 \Rightarrow b = 4;$

$P_{пр.} = 0,99999017.$

БЧХ:  $(7, 3, 4); i = 3 \rightarrow (21, 9) \Rightarrow b = 6;$

$P_{пр.} = 0,999812.$

Вывод: коды имеют одинаковую длину информационной части в двоичном представлении ( $m = 9$ ) и информационную скорость ( $9/21$ ). Но достоверность кода Р-С на два порядка лучше (5 «девяток» против 3 после запятой). Это объясняется тем, что код Р-С исправляет еще и независимые ошибки, которые могут отстоять друг от друга больше чем на  $b$  (например, в первом и в последнем символах).

Эксперимент 2.

Р-С:  $(7, 3, 5) \rightarrow (21, 9); l = 3; s = 2 \Rightarrow b = 4;$

$P_{пр.} = 0,99999017.$

БЧХ:  $(7, 3, 4); i = 2 \rightarrow (14, 6) \Rightarrow b = 4;$

$P_{пр.} = 0,99992258.$

Вывод: коды имеют одинаковую длину исправляемого пакета ( $b = 4$ ), но разные показатели достоверности (5 «девяток» против 4 после запятой). Это объясняется тем, что для кода Р-С  $b$  – минимальная (гарантированная) длина исправляемого пакета ошибок, а максимальная –  $l \cdot s$  (для нашего примера 6), а для БЧХ – максимальная (6).

Построенные модели могут быть использованы для экспериментов с целью подбора параметров кода с заданной достоверностью и максимальной эффективностью. Реализованные в них алгоритмы являются основой для программной реализации процедур коди-

рования и декодирования в реальном аппаратурно-программном базисе (PLC, ПЛИС, других вычислительных устройствах систем управления) [14].

## 5 РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате проведенных теоретических исследований получены зависимости существенных для проектирования показателей кодов (достоверность и информационная скорость) от структурных параметров кодов и характера поведения ошибок в среде передачи. Были определены аналитические зависимости, исследованы взаимовлияния дифференциальных параметров на интегральные, получены их графические иллюстрации и сделан анализ их характера.

Построены и исследованы имитационные схемотехнические модели системы управления, реализующие рассматриваемые способы кодирования, в пакете моделирования MatLab Simulink. С их помощью проведены экспериментальные исследования, которые подтвердили введенные математические положения. Другое назначение построенных моделей – задачи анализа и синтеза систем управления с заданными показателями достоверности и эффективности.

## 6 ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные исследования характеристик кодов P-C и полученные зависимости могут быть использованы при выборе способа помехоустойчивого кодирования для исправления пакетирующихся ошибок. Для заданных технических условий – длина информационной части сообщения ( $m$ ), показатели достоверности ( $P_{пр.}$ ) и характеристики среды передачи ( $p$ ,  $b$ ) можно подобрать способ кодирования и параметры кода, чтобы обеспечить максимальную информационную скорость ( $R$ ) для высокой эффективности использования ресурсов системы.

Разработанные модели и программные модули адаптированы для применения в программных модулях построения, расчета, кодирования и декодирования помехоустойчивых кодов при их практической реализации в аппаратурно-программном (ПЛИС) или программном (PLC) базисе.

## ВЫВОДЫ

В работе решена задача исследования и выбора способа помехоустойчивого двоичного и недвоичного кодирования в условиях пакетирующихся ошибок. Были получены и проанализированы зависимости показателей достоверности от параметров кодов и свойств среды передачи для обеспечения их заданных значений при максимальной информационной эффективности.

Научная новизна представленных результатов заключается в том, что предложен способ расчета показателей достоверности для двоичного БЧХ-кода, исправляющего пакет ошибок, особенностью которого является учет всех возможных вариантов распределения ошибочных и правильно принятых бит в пакете. Это позволяет эффективно решать задачи синтеза и анализа систем управления с заданными показателями

достоверности и максимальной эффективностью, подбирая структурные параметры кода и ориентируясь на свойства среды передачи информации. Также предложен оригинальный подход к исследованию зависимостей корректирующих свойств кода P-C, отличием которого от известных является оценивание характера изменений их количественных показателей через частные производные по параметрам кода. Это дает возможность разработки рекомендаций по эффективному подбору параметров кодов для требуемых показателей достоверности и максимальной эффективности с учетом ресурсных ограничений.

Практическая значимость результатов работы заключается в реализации имитационных схемотехнических моделей системы управления, использующей исследуемые способы избыточного двоичного и недвоичного кодирования. Они позволяют выполнить исследование показателей достоверности и оценить эффективность использования пропускной способности системы при различных способах кодирования, структурных параметрах кодов и моделях воздействия помех. Модели являются эффективным инструментарием для анализа и синтеза систем управления с заданными показателями достоверности и максимальной информационной скорости передачи.

Перспективы дальнейших исследований предполагаются в разработке алгоритмического и программного инструментария для расчета и сравнительного анализа характеристик избыточных кодов при действии помех различного характера поведения.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Представленные исследования проведены в рамках совместных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ с одним из ведущих отечественных разработчиков и производителей аппаратуры связи и информационно-управляющих систем – ПАО «Морион» (г. Пермь, Россия). Полученные результаты предназначены для аппаратурно-программной реализации кодирующих и декодирующих устройств, которые обеспечивают надежное взаимодействие модулей проектируемого оборудования по внутриблочной магистральной, также по локальным и транспортным каналам системы управления. Автор выражает глубокую признательность своему учителю и многолетнему руководителю работ профессору Ефиму Львовичу Кону за приобщение к научной тематике.

## ЛИТЕРАТУРА / ЛІТЕРАТУРА

1. Кон Е. Л. Теория электрической связи. Помехоустойчивая передача данных в информационно-управляющих и телекоммуникационных системах: модели, алгоритмы, структуры / Е. Л. Кон, В. И. Фрейман. – Пермь : Пермский государственный технический университет, 2007. – 317 с.
2. Blahut R. E. Theory and practice of error control codes / R. E. Blahut. – Massachusetts : Addison-Wesley Publishing Company Incorporated, 1986. – 576 p.
3. Freyman V. Research and application of noise stability providing methods at information and control systems /

- V. Freyman, I. Bezukladnikov // 2017 IEEE Conference of Russian young researchers in electrical and electronic engineering : 1–3 February 2017 : proceedings. – Saint-Petersburg : Saint-Petersburg Electrotechnical University «LETI», 2017. – P. 831–837.
4. Финк Л. М. Сигналы, помехи, ошибки / Л. М. Финк. – М. : Радио и связь, 1984. – 256 с.
  5. Viterbi A. J. Principles of digital communication and coding / A. J. Viterbi, J. K. Omura. – New York : McGraw-Hill, 2009. – 584 p.
  6. Sklar B. Digital communications. Fundamentals and applications. Second edition / B. Sklar. – New Jersey : Prentice Hall, 2001. – 1079 p.
  7. Morelos-Zaragoza R. The art of error correcting / R. Morelos-Zaragoza. – Malden : Wiley, 2006. – 269 p.
  8. Kumar A. A. Improved coding-theoretic and subspace-based decoding algorithms for a wider class of DCT and DST codes / A. A. Kumar, A. Makur // IEEE Transactions on Signal Processing. – 2010. – Vol. 58, № 2. – P. 695–708.
  9. Freyman V. Research of the Reed-Solomon codes characteristic for realization within control systems devices / V. Freyman // Radio electronics, Computer science, Control. – 2019. – № 3 (50). – P. 143–151.
  10. Kon E. L. Soft decoding based fuzzy logic for processing of elementary signals within data transmission channels of distributed control systems / E. L. Kon, V. I. Freyman, A. A. Yuzhakov // 2017 Systems of signal synchronization, generating and processing in telecommunications : 3–4 July 2017 : proceedings. – Moscow : Media-publisher, 2017. – P. 1–6.
  11. Freyman V. Application of fuzzy logic for decoding and evaluation of results within the process of information system components diagnosis / V. Freyman, M. KavaleroV // 2017 IEEE Conference of Russian young researchers in electrical and electronic engineering : 1–3 February 2017 : proceedings. – Saint-Petersburg : Saint-Petersburg Electrotechnical University «LETI», 2017. – P. 134–139.
  12. Freyman V. Methods and algorithms of soft decoding for signals within information transmission channels between control systems elements / V. Freyman // Radio electronics, Computer science, Control. – 2018. – № 4 (47). – P. 226–235.
  13. MATLAB Documentation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mathworks.com/help/matlab/>.
  14. Bhargava K. Efficient implementation of error correction coding in a communication system by using VHDL / K. Bhargava // VSRD International Journal of Electrical, Electronics and Communication Engineering. – 2012. – Vol. 2 (6). – P. 359–365.

Статья поступила в редакцию 31.05.2019.  
После доработки 01.09.2019.

УДК 621.391:004.052

## АНАЛІЗ ДОСТОВІРНОСТІ ПЕРЕДАЧІ МІЖ ПРИСТРОЯМИ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ПРИ ПАКЕТУВАННІ ПОМИЛОК

**Фрейман В. І.** – д-р техн. наук, професор кафедри «Автоматика і телемеханіка», Пермський національний дослідницького політехнічний університет, м. Перм, Росія.

### АНОТАЦІЯ

**Актуальність.** Проведено аналіз показників достовірності передачі інформації між елементами систем управління з урахуванням пакетування (групування) помилок в каналі зв'язку. Об'єктом дослідження є характеристики і параметри завадостійких циклічних двійкових і недвійкових кодів, орієнтованих на виправлення пакетів помилок. Предмет дослідження – теоретичний і експериментальний порівняльний аналіз показників достовірності кодів, що виправляють пакети помилок.

**Мета роботи** – визначення аналітичних залежностей показників достовірності обраних надлишкових кодів від їх властивостей і якостей каналу зв'язку, розробка моделей для їх експериментального дослідження, формування рекомендацій щодо вибору кодів з заданими характеристиками при певних властивостях і моделі опису помилок.

**Методи.** Використаний математичний апарат і теорія побудови завадостійких циклічних двійкових (БЧХ) і недвійкових (Ріда-Соломона) кодів. Отримано аналітичні співвідношення для визначення показників достовірності передачі з урахуванням можливих спотворень символів коду всередині пакету помилок. Досліджено залежності коригувальних властивостей і ймовірності правильної передачі від параметрів коду і помилки, наведені ілюстративні приклади. Розроблено імітаційні схемотехнічні моделі системи управління з досліджуваними способами завадостійкого кодування. Проведено експериментальні дослідження, на підставі отриманих даних зроблено висновки і запропоновані рекомендації щодо вибору параметрів кодів для заданих показників достовірності для забезпечення максимальної ефективності (інформаційної швидкості передачі).

**Результати.** Отримані залежності показників достовірності (ймовірність правильної передачі) і коригувальних властивостей (довжина пакета помилок, що виправляється) досліджуваних надлишкових кодів від їх параметрів (кількості надлишкових символів, ступеня перекоження – для БЧХ-кодів; модуль поля Гауа, кратність виправлених помилок – для кодів Ріда-Соломона). Надано рекомендації щодо використання отриманих результатів при виборі параметрів коду. Для проведення експериментальних досліджень створено і налаштовано моделі системи управління в середовищі MathWorks MatLab Simulink.

**Висновки.** Проведені в роботі дослідження дозволяють розрахувати і обґрунтовано вибрати параметри надлишкових кодів для заданих показників достовірності з урахуванням моделі поведінки помилок в каналі передачі. Це дає можливість проектувати і реалізувати надійні системи управління із заданими показниками достовірності та максимальною інформаційною швидкістю передачі.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** інформаційно-керуючі системи, достовірність, стійкість, надлишковість, циклічні коди, пакет помилок, модель.

## ANALYSIS OF THE TRANSMISSION RELIABILITY BETWEEN CONTROL SYSTEMS DEVICES WHEN ERRORS ARE PACKAGED

**Freyman V. I.** – Doctor of Technical Science, Professor of Department «Automatics and telemechanics», Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia.

### ABSTRACT

**Context.** The reliability indicators of information transmission between control systems elements, taking into account the packaging (grouping) of errors in the communication channel, are analyzed. The research object are the characteristics and parameters of noise stability cyclic binary and non-binary codes for the correction of error packets. The research subject is a theoretical and experimental comparative analysis of the reliability indicators of codes for correcting error packets.

**Objective.** The purpose of the work is to determine the analytical dependencies of the reliability indicators of the selected redundant codes from their parameters and the communication channel properties develop models for their experimental research, formulate recommendations for choosing codes with preset characteristics with certain properties, and an error description model.

**Methods.** The math methods and building theory of noise stability cyclic binary (BCH) and non-binary (Reed-Solomon) codes are used. The analytic formulas for determination of reliability indicators taking into account bits distortions within error packet are received. The dependencies for corrective properties and correct transmission probability form codes and error parameters are researched, the illustrating examples are shown. The simulation circuit design models for control systems with researched methods of noise stability encoding are developed. The experimental research has been done, based on the results, conclusions and recommendations for choice of code parameters for preset reliability indicators for providing of maximum efficiency (information rate) are made.

**Results.** The dependencies of the reliability indicators (correct transmission probability) and the corrective properties (the length of corrected errors packet) from its parameters (the number of redundancy symbols, the interleaving degree – for BCH-codes; the Galua field module, number of corrected errors – for Reed-Solomon codes) are received. The recommendations of using the received results for code parameters choice are given.

**Conclusions.** The performed researches allows calculate and reasonably choose of redundancy codes parameters for preset reliability indicators and the behavior model of errors within the communication channel. It makes possible to design and implement reliable control systems with preset reliability indicators and maximum information rate.

**KEYWORDS:** information and control systems, reliability, noise stability, redundancy, cyclic codes, error packet, simulation.

### REFERENCES

1. Kon E. L., Freyman V. I. The theory of telecommunications. The noise stability data transmission within information and control and telecommunication systems: models, algorithms, structures. Perm, Perm State Technical University, 2007, 317 p.
2. Blahut R. E. Theory and practice of error control codes. Massachusetts, Addison-Wesley Publishing Company Incorporated, 1986, 576 p.
3. Freyman V., Bezukladnikov I. Research and application of noise stability providing methods at information and control systems, *2017 IEEE Conference of Russian young researchers in electrical and electronic engineering : 1–3 February 2017 : proceedings*. Saint-Petersburg, Saint-Petersburg Electrotechnical University «LETI», 2017, P. 831–837.
4. Fink L. M. Signals, noise, errors. Radio and communication, 1984, 256 p.
5. Viterbi A. J., Omura J. K. Principles of digital communication and coding. New York, McGraw-Hill, 2009, 584 p.
6. Sklar B. Digital communications. Fundamentals and applications. Second edition. New Jersey, Prentice Hall, 2001, 1079 p.
7. Morelos-Zaragoza R. The art of error correcting. Malden, Wiley, 2006, 269 p.
8. Kumar A. A., Makur A. Improved coding-theoretic and subspace-based decoding algorithms for a wider class of DCT and DST codes, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2010, Vol. 58, No. 2, pp. 695–708.
9. Freyman V. Research of the Reed-Solomon codes characteristic for realization within control systems devices, *Radio electronics, Computer science, Control*, 2019, No. 3 (50), pp. 143–151
10. Kon E. L., Freyman V. I., Yuzhakov A. A. Soft decoding based fuzzy logic for processing of elementary signals within data transmission channels of distributed control systems, *2017 Systems of signal synchronization, generating and processing in telecommunications, 3–4 July 2017, proceedings*. Moscow, Media-publisher, 2017, pp. 1–6.
11. Freyman V., Kavalero M. Application of fuzzy logic for decoding and evaluation of results within the process of information system components diagnosis, *2017 IEEE Conference of Russian young re-searchers in electrical and electronic engineering, 1–3 February 2017, proceedings*. Saint-Petersburg, Saint-Petersburg Electrotechnical University «LETI», 2017, P. 134–139.
12. Freyman V. Methods and algorithms of soft decoding for signals within information transmission channels between control systems elements, *Radio electronics, Computer science, Control*, 2018, No. 4 (47), pp. 226–235.
13. MATLAB Documentation [Electronic resource]. Access mode: <http://www.mathworks.com/help/matlab/>.
14. Bhargava K. Efficient implementation of error correction coding in a communication system by using VHDL, *VSRD International Journal of Electrical, Electronics and Communication Engineering*, 2012, Vol. 2 (6), pp. 359–365.