

ОСОБЕННОСТИ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОГО ДЕКОДИРОВАНИЯ В СИСТЕМАХ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ

А. А. Бондарь, К. В. Авдеев

Рассмотрены алгоритмы, которые исправляют ошибки, возникающие при передаче данных по каналам радиосвязи. Приведены результаты сравнения нескольких корректирующих алгоритмов по таким критериям как исправляющая способность и вычислительная сложность. На основе проведенных исследований сформулированы рекомендации по выбору конкретного алгоритма в зависимости от текущих условий передачи данных.

Ключевые слова: помехоустойчивое кодирование, блочный код, циклический код, код Хемминга, алгоритм декодирования стираний, алгоритм декодирования стираний с выбором, алгоритм декодирования Чейза.

Введение

К современным системам цифровой связи предъявляются высокие требования по качеству передачи информации. Для соответствия требованиям применяются различные способы, одним из которых является помехоустойчивое кодирование данных. Этот метод весьма перспективен, поскольку для его реализации не требуется повышать мощность передатчика и вносить изменения в структуру радиоприемной и радиопередающей части устройства. Помехоустойчивое кодирование предполагает использование дополнительных (проверочных) битов, которые при обработке принятого сообщения способны указать на ошибки, возникшие в результате воздействия помех. Исправление ошибок, как и кодирование, происходит в вычислительной части аппаратуры и зависит только от её характеристик (вычислительной мощности). Таким образом, применяя разные алгоритмы помехоустойчивого кодирования и декодирования, можно, не изменяя аппаратной составляющей приёмо-передающего устройства, повысить помехоустойчивость системы связи.

На качество систем связи влияют такие параметры, как отношение сигнал/шум и скорость передачи данных. У определённых видов систем цифровой связи есть свои особенности, способные также оказывать влияние на помехоустойчивость. В зависимости от особенностей построения систем связи можно вывести закономерности и рекомендации для использования оптимального алгоритма кодирования и декодирования, исходя из конкретной ситуации.

Сеть мобильных абонентов

В данной статье рассматривается построение системы связи, использующей мобильные передатчики, которые составляют вместе единую сеть абонентов. Каждый участник сети может обмениваться данными со всеми другими участниками. Сеть является одноранговой – все абоненты равноправны. Поскольку абоненты являются мобильными

устройствами, то из-за их перемещения структура сети постоянно меняется. Рассмотрим варианты расположения абонентов в такой сети: все абоненты находятся в зоне досягаемости друг друга и могут обмениваться данными напрямую (рис. 1, а); б – несколько абонентов находятся вне зоны доступа друг друга, связь между ними осуществляется через промежуточных участников сети, выступающих в роли ретрансляторов (рис. 1, б); все абоненты выстроены в цепочку ретрансляторов, где каждый может связаться только с двумя соседними устройствами, а крайние участники могут обмениваться данными с одним (предпоследним) ретранслятором (рис. 1, в).

Задачей исследования было определить наиболее оптимальные алгоритмы коррекции ошибок для вышеперечисленных вариантов расположения абонентов в сети. Критериями для оценки оптимальности алгоритмов являются исправляющая способность и вычислительная сложность. Поскольку предполагается вариативное использование алгоритмов декодирования в зависимости от ситуации, то алгоритм кодирования информации должен быть универсальным и подходить для всех рассматриваемых способов исправления ошибок. В качестве такого кодирующего алгоритма был выбран код Хемминга.

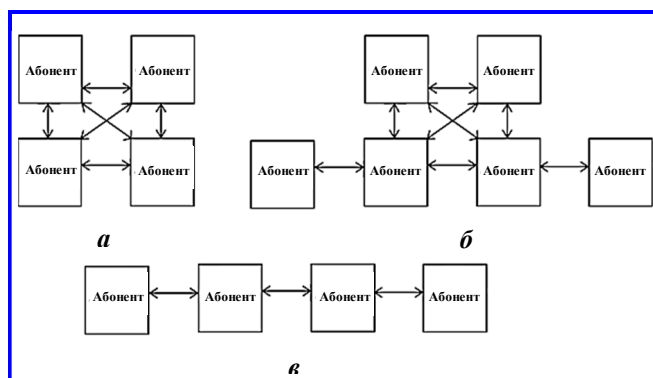


Рис. 1. Расположение абонентов в сети: а – все находятся в зоне досягаемости друг друга; б – несколько абонентов находятся вне зоны доступа друг друга; в – все абоненты выстроены в цепочку ретрансляторов

Корректирующие алгоритмы, для кода Хемминга

Код Хемминга представляет собой линейный блочный циклический код. Кодирование может быть представлено как в матричной, так и в полиномиальной форме. Принцип кодирования заключается в том, что поток передаваемых битов делится на блоки фиксированной длины с последующим добавлением к каждому блоку проверочных битов [1, 2]. Подобный алгоритм довольно прост в реализации и широко распространён.

Кодирование Хемминга позволяет исправлять ошибки, возникающие при прохождении сигнала через канал, содержащий шум. Для исправления ошибок могут применяться разные алгоритмы, рассматриваемые далее.

Алгоритм декодирования Хемминга заключается в вычислении синдрома – вектора, показывающего позицию одиночной ошибки в принятом сообщении. Математически декодирование Хемминга представляет собой умножение принятого кодового блока, содержащего исходные и проверочные биты, на проверочную матрицу. Результатом перемножения является вектор синдрома, который будет нулевым в случае отсутствия ошибок. При наличии ошибки последовательность битов в синдроме укажет на неверно принятый бит. Алгоритм Хемминга способен исправлять одну и фиксировать двойные ошибки. Его достоинством является простота вычислений.

Алгоритм декодирования Чейза опирается на код Хемминга, однако предполагает множество дополнительных операций. Работа данного алгоритма начинается с поиска наименее надежных битов. Поскольку при передаче информации по каналу связи производится модуляция, а затем к модулированному сигналу добавляется шум, на стороне приёмника каждый бит определяется как нуль или единица с некоей долей вероятности. Чем ближе вероятность к 0,5, тем недостовернее принятый бит. Выбрав определённое фиксированное количество ненадёжных битов, алгоритм Чейза подставляет в них все возможные комбинации нулей и единиц, осуществляя таким образом перебор всех возможных вариантов. В итоге появляется $(2^N - 1)$ предполагаемых слов, где N – количество выбранных ненадёжных битов. Каждое предполагаемое слово проходит процедуру декодирования алгоритмом Хемминга, после чего все декодированные предполагаемые слова сравниваются с принятым изначально вектором. Наиболее близкое к принятому вектору слово считается верным и принимается как исправленное декодированное сообщение. Алгоритм декодирования Чейза способен исправлять

большее количество ошибок, чем алгоритм декодирования Хемминга (3, 4, 5 и т.д.), однако он довольно громоздкий в вычислительном плане. Так, если алгоритм Чейза будет исправлять три ошибки, то будет сгенерировано 7 предполагаемых слов, к каждому из которых нужно применить алгоритм декодирования Хемминга. То есть алгоритм Чейза уже будет требовать в 7 раз больше вычислений, чем алгоритм Хемминга, и это без учёта расчета вероятностей каждого бита и сравнения предполагаемых слов с принятым вектором. Подводя итог, можно сказать, что достоинством алгоритма Чейза является большая исправляющая способность по сравнению с алгоритмом Хемминга, а недостатком – большое количество вычислительных операций, кратно усложняющих процедуру декодирования.

Алгоритм декодирования стираний, также как и алгоритм Чейза, начинает работу с определения наименее надежных битов. Выбранные биты стираются (или помечаются как ненадёжные). В коде Хемминга сумма по модулю двух битов, стоящих на позициях ненулевых коэффициентов проверочного полинома, равна нулю. Код Хемминга является циклическим, то есть кодовая комбинация, сдвинутая на один бит, также является кодовым словом. Таким образом, сдвигая побитово принятое слово, можно заполнить все стёртые биты. Декодирование стираний способно исправить в два раза больше ошибок, чем стандартный алгоритм Хемминга и проще в реализации обработки данных, чем алгоритм Чейза. Однако алгоритм Чейза способен исправить большее количество ошибок, чем алгоритм стираний.

Декодирование стираний с выбором сочетает в себе свойства обычного декодирования стираний и алгоритма Чейза. Если алгоритм Хемминга может исправить одну ошибку, а декодирование стираний – в два раза больше, то декодирование стираний с выбором способно исправлять три стёртых бита. При работе данного алгоритма выбираются три наименее надёжных бита, которые стираются. Далее формируются два предполагаемых слова, в которых в один из стёртых битов записана единица, в другой – нуль. К полученным предполагаемым словам применяется декодирование стираний, которое исправляет два оставшихся бита. Из двух предполагаемых слов, прошедших процедуру исправления стираний, выбирается наиболее близкое к принятому вектору. Таким образом, декодирование стираний с выбором способно исправлять большее количество ошибок, чем стандартный алгоритм стираний. При этом, как и в алгоритме Чейза, происходит генерация предполагаемых слов. Однако в случае с исправлением трёх стёртых битов таких слов будет всего два вместо се-

ми, которые сгенерировал бы алгоритм Чейза, что существенно сократит время обработки данных [3].

Декодирование стираний с синдромом способно исправлять пять стёртых битов в принятом слове и полностью повторяет декодирование стираний с выбором. Разница заключается в том, что теперь выбираются пять стёртых битов, и на позиции трёх из них подбираются все возможные комбинации. Получившиеся предполагаемые слова проходят через стандартное исправление стираний, а затем дополнительную проверку на нулевой синдром кода Хемминга. Слова, имеющие нулевой синдром, сравниваются с принятым вектором. Наиболее близкое к принятому вектору слово считается верным. Подобный алгоритм имеет преимущество в скорости обработки данных перед алгоритмом Чейза: для исправления пяти стёртых битов алгоритму Чейза понадобится генерировать тридцать один предполагаемый вектор, а алгоритму декодирования стираний с синдромом – восемь [4].

Для наглядности на рис. 2 приведена диаграмма, показывающая количество тактов, которое тратит электронно-вычислительная машина для обработки одного блока данных, закодированного кодом Хемминга (15,11), разными алгоритмами. Из диаграммы видно, что наиболее громоздким является алгоритм декодирования Чейза, исправляющий пять ошибок, однако он обладает наибольшей помехоустойчивостью из всех перечисленных алгоритмов.

На рис. 3 приведены кривые помехоустойчивости рассматриваемых алгоритмов, полученные в результате математического моделирования.

Из рис. 3 следует, что оптимальным алгоритмом с точки зрения помехоустойчивости является алгоритм декодирования Чейза, исправляющий три ошибки. Алгоритм Чейза для пяти ошибок показывает незначительное преимущество при малом отношении сигнал/шум (меньше 4 дБ), а при возрастании этого отношения даёт худшие показатели, приближаясь к декодированию стираний с синдромом. В сочетании с тем, что алгоритм Чейза для пяти ошибок является самым сложным по вычислениям, целесообразность его использования в системах связи с кодом Хемминга (15,11) можно поставить под вопрос.

Особенности работы корректирующих алгоритмов в зависимости от расположения абонентов сети

В ходе исследований для каждого из вариантов расположения абонентов в сети, представленных на рис. 1, были выявлены особенности применения алгоритмов декодирования.

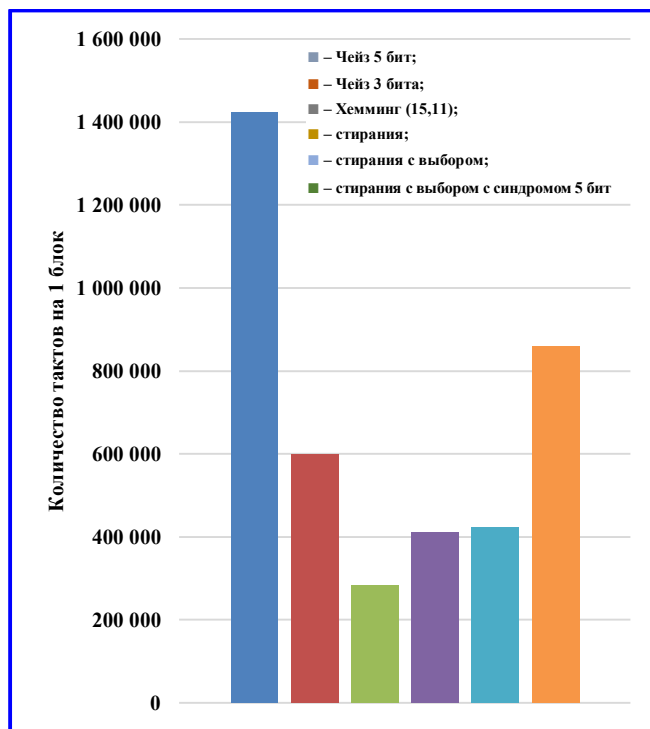


Рис. 2. Вычислительная сложность алгоритмов декодирования

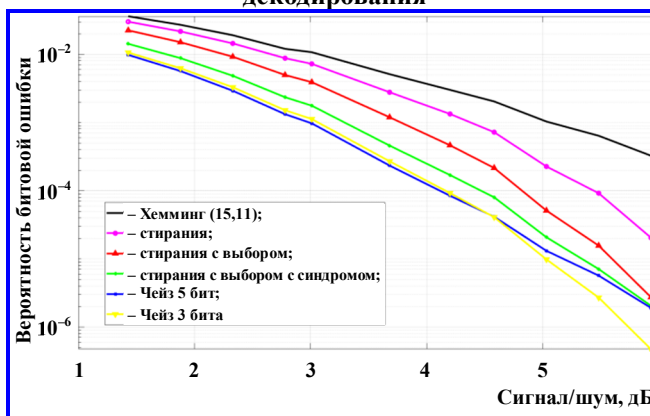


Рис. 3. Кривые помехоустойчивости алгоритмов декодирования

В случае, когда каждый абонент может связываться со всеми остальными абонентами (см. рис. 1, а), целесообразность использования того или иного алгоритма определяется в зависимости от отношения сигнал/шум и требуемой скорости передачи данных. Поскольку скорость передачи зависит от времени, затрачиваемого на обработку одного информационного блока, то выбор алгоритма представляет собой поиск компромиссного варианта исправляющей способности и сложности вычислений. При больших отношениях сигнал/шум целесообразно использовать более простые алгоритмы, поскольку они справляются с малым количеством ошибок и требуют мало времени на обработку сообщений. В этом случае обеспечивается высокая скорость передачи данных.

По мере уменьшения отношения сигнал/шум, когда количество ошибок в принятых сообщениях возрастает, имеет смысл применять более сложные алгоритмы декодирования, которые способны исправить большее количество ошибок. Такой подход снизит скорость передачи данных, но обеспечит надёжность связи.

В случаях, когда или часть абонентов может связываться только с одним соседним абонентом (см. рис. 1, б), или все абоненты выстроены в цепь (см. рис. 1, в), помимо отношения сигнал/шум на качество передаваемой информации влияет также и количество абонентов-ретрансляторов (абоненты, находящиеся между передающим и принимающим пользователем). Каждый раз, проходя через канал связи, сообщение подвергается воздействию помех. Соответственно, чем больше абонентов-ретрансляторов находится между передатчиком и приёмником, тем большим искажениям подвергнется сообщение. Если для простоты принять отношение сигнал/шум одинаковым во всей системе связи, то и вероятность битовой ошибки $P_{\text{ош}}$ будет везде одинаковой. Тогда при передаче через N ретрансляторов вероятность верного принятия бита будет равна:

$$P = 1 - (1 - P_{\text{ош}})^N,$$

где $(1 - P_{\text{ош}})$ – вероятность верного приёма бита после однократной передачи по каналу связи. Таким образом, по мере увеличения количества ретрансляторов уменьшается вероятность верного приёма данных.

В рассмотренном выше случае предполагается, что абонент-ретранслятор только передаёт сообщение без какой-либо его обработки. Если в работу ретранслятора добавить алгоритм, исправляющий ошибки, то вероятность верного принятия бита будет равна:

$$P = 1 - (1 - P_{\text{ош.исп}})^N,$$

где $P_{\text{ош.исп}}$ – вероятность битовой ошибки после исправления сообщения.

Таким образом, применяя исправляющие алгоритмы в ретрансляторах, можно добиться уменьшения вероятности битовой ошибки. Однако при наличии большого числа промежуточных абонентов-ретрансляторов будет происходить постепенное накопление ошибок. Накапливаемые ошибки можно разделить на два типа: первый – ошибки, которые добавляются к сообщению в результате воздействия шума канала; второй – ошибки, кото-

рые возникли в сообщении в результате неверного исправления. Ошибки первого типа приводят к появлению ошибок второго типа. Например, алгоритм Хемминга способен исправлять одну ошибку. Если в передаваемом сообщении ошибок было больше одной, то вместо их исправления алгоритм Хемминга увеличит количество ошибок, что ухудшит ситуацию. Получается, что при невозможности исправить ошибки первого типа, корректирующий алгоритм добавит в сообщение ошибки второго типа, чем усугубит ситуацию. При обработке сообщения следующим ретранслятором в него будут добавлены новые ошибки, что приведёт к ещё большему искажению передаваемой информации. Можно сделать вывод, что наличие даже одного неверно исправленного бита приведёт к каскадному увеличению количества неверных битов в сообщении при передаче данных по цепи ретрансляторов. Чем больше ретрансляторов будет в цепи, тем сильнее будет искажаться информация.

Для уменьшения скорости накопления ошибок при передаче данных по цепи ретрансляторов можно использовать полную перекодировку сообщений. Полная перекодировка предполагает после применения корректирующего алгоритма проводить новое кодирование данных, то есть отбрасывать проверочные биты и заново кодировать информационную часть сообщения. Такой подход позволяет избавиться от неисправленных ошибок, содержащихся в проверочных битах сообщения. Процедура кодирования алгоритмом Хемминга всегда одинакова и не требует большого количества вычислений, поэтому перекодировка не окажет существенного влияния на быстродействие системы.

В результате проведённых исследований было установлено, что эффективность применения перекодировки зависит от корректирующего алгоритма. На рис. 4 приведены результаты математического моделирования работы системы из пяти ретрансляторов.

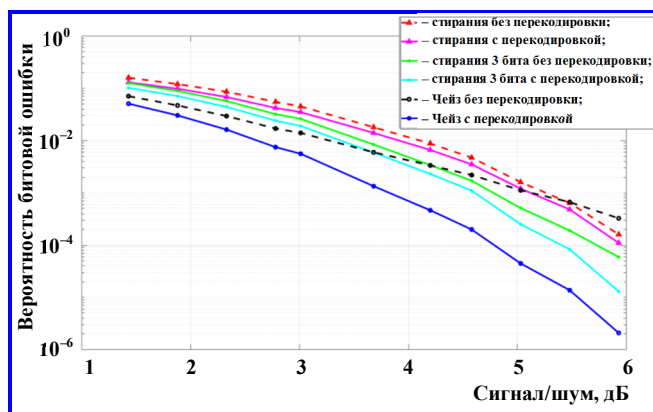


Рис. 4. Преимущество перекодировки

Алгоритм Хемминга, исправляющий одну ошибку, имеет примерно одинаковые показатели с применением перекодировки и без неё. Алгоритм декодирования стираний с использованием перекодировки повышает свою помехоустойчивость на 0,1 дБ при вероятности битовой ошибки на входе ретранслятора 10^{-3} . Алгоритм декодирования стираний с выбором при вероятности ошибки 10^{-3} , в совокупности с перекодировкой, имеет преимущество на 0,25 дБ. Алгоритм декодирования Чейза для трёх битов без применения перекодировки и при отношении сигнал/шум больше 5 дБ показал худшие результаты, чем алгоритм декодирования стираний с выбором. Однако при использовании алгоритма Чейза вместе с перекодировкой он получает преимущество над алгоритмом декодирования стираний с выбором на 2 дБ при вероятности битовой ошибки 10^{-3} [5].

Заключение

Подводя итог, можно сказать, что выбор корректирующего алгоритма определяется исходя из таких параметров, как расположение передающего и принимающего абонентов в сети и уровень шума в канале передачи.

Если передающий абонент может напрямую связаться с принимающим, то применение перекодировки нецелесообразно, а корректирующий алгоритм следует выбирать, опираясь на уровень шума в канале. Чем выше уровень шума, тем более сложный и помехоустойчивый алгоритм следует использовать. При таком подходе из-за повышения нагрузки на вычислительную часть приемника скорость передачи данных может снизиться, зато будет обеспечена необходимая помехоустойчивость.

В случае, когда прямой связи у передатчика с приемником нет, необходимо рассматривать количество промежуточных абонентов-ретрансляторов и уровень шумов в каждом из каналов передачи. Чем больше количество ретрансляторов, тем оправданнее применение полной перекодировки в совокупности с исправляющими алгоритмами. При высоких уровнях шумов, как и в случае, описанном выше, абонент-ретранслятор выбирает наиболее помехоустойчивый алгоритм. Если уровень шумов небольшой, то выбирается более про-

стой алгоритм, позволяющий увеличить скорость передачи данных либо разгрузить вычислительную часть ретранслятора.

Для того чтобы система могла сама определять отношение сигнал/шум в канале, можно использовать динамический способ оценки качества системы цифровой связи [6]. При соединении способности вычислять качество связи и выбирать наиболее оптимальный в текущий момент корректирующий алгоритм получается система связи, способная самостоятельно подстраиваться под изменяющиеся условия окружающей среды.

Дальнейшее направление исследований – создание математической модели такой системы связи.

Литература

1. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр ; пер. с англ. – Изд. 2-е, испр. – Москва : Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.
2. Кларк Дж. Кодирование с исправлением ошибок в системах цифровой связи / Дж. Кларк, Дж. Кейн ; пер. с англ. – Москва : Радио и связь, 1987. – 392 с.
3. Бондарь А. А. Исследование алгоритма декодирования стираний с выбором / А. А. Бондарь // Системы компьютерной математики и их приложения материалы XXI Международной научной конференции. – Смоленск : Издательство СмолГУ, 2020. – Вып. 21. – С. 11–19.
4. Бондарь А. А. Исследование различных алгоритмов декодирования стираний для повышения помехоустойчивости цифровой системы связи / А. А. Бондарь // Системы компьютерной математики и их приложения материалы XXII Международной научной конференции. – Смоленск : Издательство СмолГУ, 2021. – Вып. 22. – С. 37–42.
5. Бондарь А. А. Применение исправляющих алгоритмов, использующих полную и частичную перекодировку в цепи ретрансляторов / А. А. Бондарь, К. В. Авдеев // Сборник научных статей VI МНПК «Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем» «РАДИОИНФОКОМ-2022». – Москва : МИРЭА – Российский технологический университет, 2022. – С. 191–195.
6. Тихонова О. В. Динамический способ оценки качества цифровой связи: моделирование и исследование / О. В. Тихонова, А. А. Бондарь // Системы компьютерной математики и их приложения материалы XXIII Международной научной конференции. – Смоленск : Издательство СмолГУ, 2022. – Вып. 23. – С. 40–45.

Поступила в редакцию 19.12.2022

Александр Александрович Бондарь, старший преподаватель кафедры РЭСК, т. 8 (916) 024-76-56, e-mail: alex.kvitkovsky@yandex.ru.
Константин Вячеславович Авдеев, ассистент кафедры РЭСК, т. 8 (965) 109-38-21, e-mail: marselo1910@gmail.com. (МИРЭА – Российский технологический университет).

FEATURES OF NOISE-RESISTANT DECODING IN MOBILE COMMUNICATION SYSTEMS

A. A. Bondar, K. V. Avdeev

The article analyzes different error-correcting algorithms that are used in the process of information transmission via radio channels. The results of comparing these algorithms in terms of their error-correcting capability and computational complexity are presented in this paper. Based on the conducted research, recommendations on the choice of a particular algorithm are made, depending on actual conditions for data transmission.

Keywords: noise-resistant coding, block code, cyclic code, Hamming code, erasure code, erasure code with a choice, Chase decoding algorithm.

References

1. Bondar A. A., Avdeev K. V. Application of Corrective Algorithms Using Full and Partial Recoding in the Chain of Repeaters / A. A. Bondar, K. V. Avdeev // Collection of scientific articles of VI International Research and Practical Conference 'Actual problems and prospects of development of radio engineering and infocommunication systems' 'RADIOIN-FOCOM-2022'. Moscow MIREA – Russian Technological University, 2022. – P. 191–195.
2. Tikhonova O. V., Bondar A. A. Dynamic Way to Assess the Quality of Digital Communication: Modelling and Research // Computer mathematics systems and their applications. Proceedings of XXIII International Scientific Conference, issue 23. Smolensk, Publishing House of Smolensk State University 2022. – P. 40–45.
3. Bondar A. A. – Study of the Algorithm of Erasure Decoding with Choice // Computer mathematics systems and their applications. Proceedings of XXI International Scientific Conference, issue 21. Smolensk, Publishing House of Smolensk State University 2020. – P. 11–19.
4. Bondar A. A. Study of Different Erasure Decoding Algorithms for Improvement of Digital Communication System Noise Immunity // Computer mathematics systems and their applications. Proceedings of XXII International Scientific Conference, issue 22. Smolensk, Publishing House of Smolensk State University 2021. – P. 37–42.
5. Skliar B. Digital Communication. Theoretical Basis and Practical Application. 2-nd edition, rev.; translated from English – M.: Williams Publishing House, 2003. – P. 1104.
6. George C. Clark Jr., J. Bibb Cain. Error-Correction Coding for Digital Communications: translated from English. – M.: Radio and communications, 1987. – P. 392.

*Aleksandr Aleksandrovich Bondar, Senior Lecturer at the Department of RSC,
tel. +7 (916) 024-76-56, e-mail: alex.kvitkovsky@yandex.ru.*

*Konstantin Vyacheslavovich Avdeev, Assistant Lecturer at the Department of RSC,
tel. +7 (965) 109-38-21, e-mail: marselo1910@gmail.com.
(MIREA – Russian Technological University).*