

УДК 621.391

Перспективы систем передачи данных с поддержкой технологии прямого исправления ошибок

Баталин Н. С.✉, Подайко С. В., Кукунин Д. С.

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

Постановка задачи: в настоящее время активно развивается рынок телекоммуникационных услуг, требующих обеспечения надежной передачи данных между сетевыми узлами. **Предмет исследования:** в статье рассматривается применение технологии прямого исправления ошибок (FEC, аббр. от англ. Forward Error Correction) в рамках адаптивной системы передачи данных. Использование этой технологии подразумевает применение алгоритмов помехоустойчивого кодирования к передаваемой информации, тем самым минимизируя потребность в повторной передаче данных и уменьшая нагрузку на сеть. **Цель исследования:** обзор современных методов оптимизации технологии FEC в адаптивной системе передачи данных для повышения качества канала связи и снижения нагрузки на приемопередающие устройства. **Метод исследования:** анализ технологий исправления ошибок в системах передачи данных. **Результат:** проведен обзор технологии FEC. Рассмотрены преимущества и недостатки ее применения и проблемы адаптивной реализации.

Ключевые слова: FEC, адаптивная модель передачи данных, помехоустойчивое кодирование.

Источник финансирования: исследование выполнено в рамках прикладных научных исследований по государственному заданию СПбГУТ на 2023 год, регистрационный номер 123060900012-6 в ЕГИСУ НИОКТР.

Введение

На сегодняшний день актуальность технологии FEC (аббр. от англ. Forward Error Correction, прямое исправление ошибок) обусловлена появлением новых телекоммуникационных услуг, чувствительных к повторной передаче информации. Минимизация числа повторных передач для таких услуг может быть достигнута путем добавления к информационным последовательностям избыточных элементов, что позволяет не только обнаруживать, но и исправлять на приеме возникшие в процессе передачи данных ошибки [1].

Размер избыточной части передаваемой последовательности зависит от выбранного помехоустойчивого кода. Обоснованием выбора того или иного кода являются его корректирующие способности и вероятность ошибки в канале связи [2]. Таким образом, выбор оптимального кода позволит системе передачи данных гарантировать заданный уровень помехоустойчивости при минимальной избыточности. Очевидным недостатком данной технологии является увеличение затрат на вычислительные ресурсы: процессорное время и утилизацию оперативной памяти, что ведет к росту задержки и возможному ограничению низкопроизводительных устройств сферы интернета вещей.

Библиографическая ссылка на статью:

Баталин Н. С., Подайко С. В., Кукунин Д. С. Перспективы систем передачи данных с поддержкой технологии прямого исправления ошибок // Вестник СПбГУТ. 2023. Т. 1. № 1. С. 5. EDN: DWAXXI

Reference for citation:

Batalin N., Podaiko S., Kukunin D. Prospects of Data Transmission Systems with Support for Forward Error Correction Technology // Herald of SPbSUT. 2023. Vol. 1. Iss.1. P. 5. EDN: DWAXXI

Методы применения FEC

Применение технологии FEC подразумевает использование кодирующего устройства, на вход которого поступает информационная последовательность длины k элементов, а на выходе формируется последовательность $U = f(k)$, $U > k$, принадлежащая пространству разрешенных кодовых комбинаций для данного типа кодера. Таким образом, если на вход декодирующего устройства поступит комбинация, не принадлежащая разрешенным, будет принято решение о наличии ошибки. В зависимости от количества ошибок в принятой комбинации и корректирующих способностей декодера принятая последовательность может быть исправлена до разрешенной [3]. Следует отметить, что не всегда полученная в результате исправления ошибок разрешенная комбинация соответствует комбинации на выходе кодера. Данное замечание описано ниже.

Одним из наиболее распространенных методов FEC является кодирование по Хэммингу. Его распространенность обеспечивается простой реализацией и относительно небольшой избыточностью, позволяющей исправлять одиночные ошибки в передаваемых последовательностях [4].

Рассмотрим код Хэмминга (n, k) , при $n = 7, k = 4$, где n — длина кодового слова на выходе кодера; k — длина информационной последовательности; $r = n - k = 3$ — длина проверочной части. Общее число возможных комбинаций определяется выражением $N_n = 2^n = 32$, из которых $N_k = 2^k = 16$ являются разрешенными [5]. Избыточность кода соответствует соотношению $\frac{r}{n} = \frac{3}{7}$, значение избыточности является ключевым критерием выбора кода при соответствующих корректирующих способностях.

Пусть передаваемая информационная последовательность соответствует $k = \{1011\}$, а образующий полином $g(x)$ равен $g(x) = x^3 + x + 1$, тогда:

$$G(x) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{vmatrix},$$

$$H(x) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix},$$

$$U = m * G(x) = 1011100,$$

где $G(x)$ — порождающая матрица образующего полинома $g(x)$; $H(x)$ — проверочная матрица, U — комбинация на выходе кодера.

Поскольку код является систематическим, декодеру известно, какие четыре бита принятой комбинации являются информационными. Проверка наличия ошибок выполняется следующим образом:

$$S = U' * H^T(x),$$

где S — синдром ошибки; $U' = U + e$ — комбинация на входе декодера; e — полином ошибки.

Синдром S принятой последовательности U' определяет позицию ошибки e и не зависит от последовательности U . Синдромы можно вычислить заранее по формуле:

$$S = e * H^T(x).$$

В таблице 1 представлены значения синдрома для всех возможных одиночных ошибок в последовательности из семи символов.

Нетрудно заметить, что поскольку количество проверочных битов равно трем и всевозможные сочетания нулей и единиц соответствуют конкретному вектору единичной ошибки, коррекция большего числа ошибок невозможна.

Таблица 1. Синдромы для всех возможных одиночных ошибок

Вектор ошибки	Синдром ошибки	Десятичный код синдрома
1000000	110	6
0100000	011	3
0010000	111	7
0001000	101	5
0000100	100	4
0000010	010	2
0000001	001	1
0000000	000	0

Рассмотрим ситуацию, когда на вход декодера поступила последовательность с двумя ошибками. Пусть $e = \{0110000\}$, тогда $U' = 1101100$. В результате работы декодера получен синдром $S = U' * H^T(x) = 100$, который, согласно таблице 1, указывает на ошибку в пятом разряде. При повторной попытке декодирования уже исправленной последовательности $U^* = 1101000$, полученный синдром соответствует $S^* = U^* * H^T(x) = 000$, тогда информационная комбинация равна $k^* = \{1101\}$. В данном случае произошла ошибка второго рода: декодер скорректировал разряд последовательности до ошибочной комбинации, считая ее разрешенной.

Поскольку ошибки второго рода являются уязвимым местом для системы передачи данных, рекомендуется осуществлять дополнительную проверку, например, передавая хеш-сумму выходной последовательности кодера. Так, в случае для кода Хэмминга ($n = 7, k = 4$) описанного выше, для возможности обнаружения двух ошибок можно добавить дополнительный разряд к выходной последовательности кодера, обеспечивающий контроль четности единиц [6].

Кроме того, существуют и другие методы реализации FEC, такие, как кодирование Боуза — Чоудхури — Хоквингема (БЧХ), кодирование Рида — Соломона и турбокодирование. Особый интерес представляет код Рида — Соломона, позволяющий исправлять ошибки большой кратности [7]. Однако он является недвоичным, а все операции выполняются в поле Галуа, поэтому его реализация требует довольно больших затрат аппаратных ресурсов и может вносить дополнительную задержку в систему передачи данных. Выбор оптимального метода FEC является нетривиальной задачей, решение которой может быть реализовано адаптивной системой передачи данных.

Применение модели адаптивной системы передачи данных

На рисунке 1 представлена классическая модель цифровой системы передачи данных. Кодер канала данной модели реализует избыточность, которая до недавнего времени использовалась только для проверки на наличие ошибок принятой в декодер информации. При обнаружении ошибки принимающая сторона запрашивает повторную отправку ошибочного блока информации, но не пытается эту ошибку исправить.

Отсутствие необходимости исправления ошибок во многом является следствием развития вычислительных мощностей и высокоскоростных каналов связи, в которых повторная передача информации является менее затратной процедурой, чем исправление ошибок. Как следствие, целевой задачей кодера канала в таких системах является использование простых помехоустойчивых кодов исключительно для обнаружения ошибок принимающей стороной. Следует отметить, что в некоторых технологиях используются CRC-коды (аббр. от англ. Cyclic Redundancy Check, циклический избыточный код), например, X.25, Bluetooth, Ethernet, корректирующие способности которых позволяют исправлять ошибки, однако на практике их применение ограничивается только обнаружением [5].

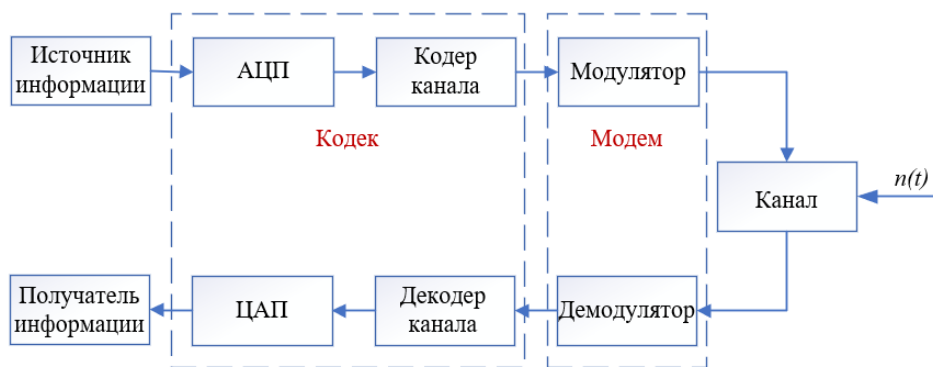


Рис. 1. Модель цифровой системы передачи данных

Появление технологии FEC связано в том числе с развитием телекоммуникационных услуг, базирующихся на беспроводных низкоскоростных сетях связи с мощностью информационного сигнала близкого к уровню шума. Здесь может наблюдаться ситуация, при которой услуги, использующие данные сети, могут быть чувствительны к повторной передаче информации. Тогда кодер канала таких сетей должен использовать более сложные помехоустойчивые коды, позволяющие и обнаруживать, и исправлять ошибки с целью сокращения числа повторных передач информации.

Результатом развития технологии FEC является ее адаптивное применение в зависимости от качества канала — A-FEC (аббр. от англ. Adaptive Forward Error Correction, адаптивная прямая коррекция ошибок). A-FEC подразумевает наличие в модели системы передачи данных дополнительного логического блока, задачей которого является контроль частоты ошибок и принятие решения об увеличении (уменьшении) избыточности или смене метода FEC [8]. На рисунке 2 этот логический блок представлен как блок контроля разрядности (БКР).

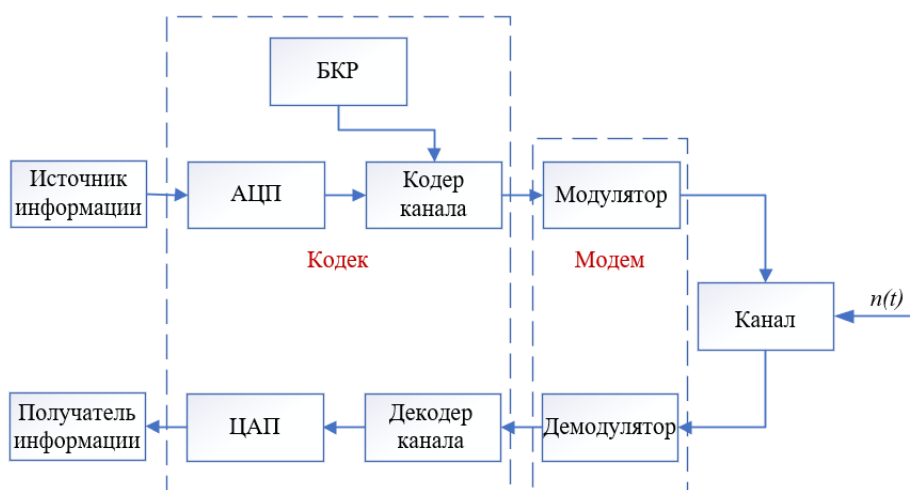


Рис. 2. Структурная схема адаптивной системы передачи данных

Адаптивная система передачи данных позволяет адаптироваться к изменяющимся условиям сети и оптимизировать передачу данных. Передающая сторона кодирует информационную последовательность некоторым избыточным кодом. Принимающая сторона на основе этой избыточности может исправить возникшие ошибки при прохождении данных по каналу связи [9]. На принимающей стороне могут возникнуть следующие ситуации:

- ошибка исправлена верно;
- ошибка обнаружена, но не исправлена;
- ошибка исправлена до ложной разрешенной комбинации — ошибка второго рода.

Основной проблемой такой системы передачи данных является последний случай. Ошибка второго рода может возникнуть при большем числе ошибок, чем способен обнаружить кодер. Адаптивная система передачи позволяет вести статистику о частоте исправленных и обнаруженных ошибок и

обмениваться ею между узлами сети. На основании данной статистики может быть принято решение об увеличении (уменьшении) избыточности или об изменении метода кодирования [10].

Следует отметить, что контроль корректирующих способностей кодера также связан с нагрузкой на вычислительные ресурсы. Помимо этого имеет значение частота отклика — обратной связи о статистике ошибок. Подобная информация также является служебной, занимает полосу пропускания и увеличивает нагрузку на систему передачи данных. Также важен интервал сбора статистики: постоянный контроль декодера может оказаться слишком затратным.

Модель адаптивной системы передачи данных может быть применена во многих областях, где требуется передача данных в условиях различных помех: в таких, например, как сенсорные и оптических транспортных сети.

Адаптивная реализация FEC может применяться в *сенсорных сетях* для уменьшения числа ошибок между устройствами, расположенными в труднодоступных и удаленных районах [11]. Если устройство получает данные с ошибками, оно должно запросить повторную передачу данных, что может занять много времени. FEC позволяет исправить ошибки без необходимости повторной передачи данных, что уменьшает задержку и повышает скорость передачи.

Применение A-FEC также находит применение в высокоскоростных сетях, таких как *оптические транспортные сети*, где скорость достигает 100 Гбит/с и выше. При использовании FEC можно увеличить расстояние передачи данных без дополнительных инвестиций в инфраструктуру, что позволит снизить общую стоимость эксплуатации сети [12].

Достоинством модели адаптивной передачи данных является ее способность автоматически подстраиваться к изменениям в канале связи, что обеспечивает стабильность передачи данных даже при неблагоприятных условиях [13]. Однако следует учитывать некоторые недостатки данной модели, такие как сложность ее настройки и необходимость выбора оптимальных методов обработки ошибок.

Проблемы реализации адаптивной системы передачи данных

Основной сложностью реализации адаптивной системы передачи данных является логика принятия решения о смене метода FEC. Проблема, главным образом, связана с контролем ошибок второго рода, поскольку для их детектирования на принимающей стороне должна быть известна исходная информационная последовательность, в противном случае ложное исправление уже невозможно будет определить.

Наиболее простым способом контроля состояния канала является остановка передачи информационных данных на некоторое время и последующая передача специальных тестовых последовательностей, заранее известных обеим сторонам. Данная процедура позволит выявить частоту ошибок, в том числе второго рода, и принять соответствующее решение [14]. Очевидно, что описанная процедура контроля теряет актуальность в канале с динамически меняющимся уровнем шума, поскольку имеет низкую скорость реагирования. Еще одним недостатком является отказ системы передачи данных в обслуживании для проведения тестирования канала.

В качестве альтернативного способа контроля состояния канала может быть предложено решение на основе оценки частоты появления запрещенных кодовых комбинаций, принятых декодером. В этом случае процедура контроля не требует остановки передачи информационных данных и (или) передачи служебных последовательностей [15]. Однако сама процедура контроля может быть затратной для системы передачи данных. Так, непрерывный контроль может повысить реакцию системы на изменение состояния канала, однако снизит энергоэффективность устройств и повысит задержку передачи информации за счет реализации дополнительной логики для сбора и обработки статистики.

Таким образом, при выборе оптимального механизма адаптации следует учитывать продолжительность проведения тестирования, величину порогового коэффициента потерянных данных, а также особенности процедуры обмена служебными сообщениями о смене метода FEC. Следует отметить, что время измерения и величина порогового значения также могут быть заданы динамически в зависимости от состояния канала. Процедура обмена служебными сообщениями о смене метода FEC должна быть понятной для устройств — отличимой от информационных последовательностей, а также содержать минимальное число служебных сообщений для поддержания высокой пропускной способности.

Еще одной проблемой здесь является обеспечение целостности данных, которое, как правило, осуществляется протоколом вышестоящего уровня модели OSI (аббр. от англ. Open Systems Interconnection Model, модель взаимодействия открытых систем), при помощи запроса на повторную передачу. Под обеспечением целостности здесь понимается дополнительная проверка информационной последовательности на выходе декодера с целью исключения ошибок второго рода. В зависимости от критичности передаваемых данных ошибка второго рода может стать серьезной проблемой [16].

Одним из решений задачи исключения ложного приема является дополнительная передача контрольной суммы (а в некоторых случаях хеш-суммы) информационной последовательности. Очевидно, что это приведет к увеличению накладных расходов на вычислительные ресурсы приемопередающих устройств, последующему росту задержки передачи информации, и, как следствие, к снижению пропускной способности канала. Однако подобное решение можно сочетать с применением цифровой подписи, что позволит не только проверять целостность, но и аутентифицировать устройства друг перед другом, тем самым избежав атаки «человек посередине», при которой злоумышленник совершает попытку подмены разрешенных кодовых комбинаций.

Заключение

В настоящей статье проведен обзор технологии FEC, в частности ее адаптивной реализации. Ее востребованность растет с появлением новых услуг, базирующихся преимущественно на беспроводных сетях и чувствительных к повторной передаче данных в условиях помех.

Адаптивная реализация технологии FEC призвана оптимизировать систему передачи данных: минимизировать количество повторно переданных блоков данных, снизить нагрузку на вычислительные ресурсы и повысить энергоэффективность приемопередающих устройств, которые во многих случаях предназначены для автономной работы.

В статье рассмотрены проблемы реализации адаптивной системы передачи данных, решение которых может являться предметом дальнейшего исследования с целью повышения надежности канала и минимизации вычислительной нагрузки. Данное направление является перспективным для внедрения новых услуг, в частности при использовании низкопроизводительных устройств, применяемых в сфере интернета вещей.

Литература

1. Макаренко С. И. Помехозащищенность наземных абонентских терминалов системы спутниковой связи Starlink // Системы управления, связи и безопасности. 2023. № 2. С. 81–101. DOI: 10.24412/2410-9916-2023-2-81-101
2. Кульбида В. А. Система передачи дискретной информации с адаптивным помехоустойчивым кодированием // Омский научный вестник. 2011. № 3 (103). С. 284–288.
3. Сащенко Н. Н. Интеллектуальная адаптивная система передачи информации в распределенных автоматизированных системах управления. Дис. ... канд. техн. наук. Серпухов: Межрегиональное общественное учреждение «Институт инженерной физики», 2006. 166 с.
4. Ефанов Д. В. Особые свойства кодов Хэмминга, проявляющиеся при синтезе самопроверяемых цифровых устройств // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2023. Т. 66. № 2. С. 85–99. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-2-85-99
5. Кочетова И. В., Левенец А. В. Имитационное моделирование системы передачи данных с адаптивным выбором помехоустойчивого кода по оценке состояния канала связи // Информатика и системы управления. 2020. № 4 (66). С. 17–24. DOI: 10.22250/isu.2020.66.17-24
6. Сапожников Вал. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В. Исследование свойств кодов Хэмминга и их модификаций в системах функционального контроля // Автоматика на транспорте. 2015. Т. 1. № 3. С. 311–337.
7. Юдин А. П. Проблемы обеспечения информационной безопасности телекоммуникационных технологий предприятия // Вестник науки. 2023. Т. 2. № 5 (62). С. 437–443.
8. Иванов М. С., Шушков А. В., Макаренко С. И. Повышение скорости передачи данных в сети воздушной радиосвязи управления летательными аппаратами за счет адаптивного использования энергетического, сигналь-

ного и частотного сетевых ресурсов. Часть 1. Модели и методика повышения скорости передачи данных // Системы управления, связи и безопасности. 2023. № 1. С. 125–219. DOI: 10.24412/2410-9916-2023-1-125-219

9. Исаева О. С., Исаев С. В., Кулясов Н. В. Формирование адаптивных рассылок брокера данных интернета вещей // Информационно-управляющие системы. 2022. № 5 (120). С. 23–31. DOI: 10.31799/1684-8853-2022-5-23-31

10. Болодурина И. П., Парфенов Д. И. Оптимизация управления распределением трафика в программно-управляемой инфраструктуре виртуального ЦОД на основе имитационной модели // Вестник ВГУИТ. 2017. Т. 79. № 1 (79). С. 99–105. DOI: 10.20914/2310-1202-2017-1-99-105

11. Богомолова Н. Е. Метод адаптивного управления сетью передачи данных // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2012. Т. 12. № 6. С. 48–50.

12. Арбузов В. В., Бережная О. В., Лопатченко Б. К. Особенности построения адаптивных систем передачи информации // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2015. № 7–1. С. 41–45.

13. Куприянова О. В., Левенец А. В., Чье Е. У. Моделирование систем передачи данных с адаптацией к состоянию канала связи // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2016. № 1 (62). С. 120–132. DOI: 10.17212/1814-1196-2016-1-120-132

14. Служивый М. Н. Адаптивные системы радиосвязи // Вестник Ульяновского государственного технического университета. 2012. № 3 (11). С. 38–49.

15. Носов В. И., Ладан А. С., Зиновьев М. В. Определение оптимальной длины кадра в сети наземного цифрового телевизионного вещания // Вестник СибГУТИ. 2022. № 2 (58). С. 40–54. DOI: 10.55648/1998-6920-2022-16-2-40-54

16. Kukunin D., Berezkin A., Zadorozhnyaya A., Karelin E., Shestakov A. Model of Adaptive Data Transmission System // Proceedings of the 13th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT, Brno, 25–27 October 2021). IEEE, 2021. PP. 200–205. DOI: 10.1109/ICUMT54235.2021.9631637

**Статья поступила 11 октября 2023 г.
Одобрена после рецензирования 3 ноября 2023 г.
Принята к публикации 10 ноября 2023 г.**

Информация об авторах

Баталин Никита Сергеевич — студент института магистратуры (направление подготовки: 11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи») Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: batalin.ns@sut.ru

Подайко Светлана Викторовна — студентка факультета ИКСС Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: podaiko.sv@sut.ru

Кукунин Дмитрий Сергеевич — кандидат технических наук, ведущий инженер дирекции по инновационным разработкам компании АО НПП ИСТА-Системс (разработка комплексных систем безопасности), доцент кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: kukunin.ds@sut.ru

Prospects of Data Transmission Systems with Support for Forward Error Correction Technology

N. Batalin ✉, S. Podaiko, D. Kukunin

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Problem statement: currently, the market of telecommunication services that require reliable data transmission between network nodes is actively developing. **Research subject:** the article discusses the use of forward error correction (FEC) technology in the framework of an adaptive data transmission system. The use of this technology implies the application of noise-resistant coding algorithms to the transmitted information, thereby minimizing the need for retransmission of data and reducing the load on the network. **The purpose of the work:** review of modern methods of optimization of FEC technology in an adaptive data transmission system in order to improve the quality of the communication channel and reduce the load on the transceiver devices. **Method:** analysis of error correction technologies in data transmission systems. **Result:** a review of the FEC technology was carried out. The advantages and disadvantages of its application and the problems of adaptive implementation are considered.

Keywords: FEC, adaptive data transmission model, error correction coding.

Information about Authors

Nikita Batalin – graduate student of The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications. E-mail: batalin.ns@sut.ru

Svetlana Podaiko – student of the faculty ICSS (The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: podaiko.sv@sut.ru

Dmitry Kukunin – Ph. D. of Engineering Sciences. Leading engineer of the Directorate for Innovative Developments of JSC NPP ISTA-Systems (development of integrated security systems), Associate Professor of the Department of Communication Networks and Data Transmission of The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications. E-mail: kukunin.ds@sut.ru