

УДК 004.942

Ю. Д. ИВАНОВ, Б. В. ЛОЗКА, Е. О. КОЗЛЮК

СОСТАВНАЯ МОДЕЛЬ ИСТОЧНИКА ОШИБОК В ДИСКРЕТНЫХ КАНАЛАХ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДАННЫХ

Одесский национальный политехнический университет, Одесса, Украина

Разработана составная модель источника ошибок в реальных дискретных каналах преобразования данных, основанная на совместном использовании канала с независимыми ошибками и обобщенного канала с коррелированными ошибками, образующими пакеты на фоне независимых ошибок. Организация пакетных ошибок в таком обобщенном канале основана на реализации принципа сжатия отдельных участков фоновых независимых ошибок, что вызывает образование участков, полностью свободных от ошибок. Наличие таких безошибочных участков в канале преобразования не отражает реальные процессы образования ошибок, что приводит к необходимости совместного использования обобщенного канала с пакетными ошибками и канала с независимыми фоновыми ошибками, что обеспечивает присутствие фоновых ошибок на всех участках, кроме пакетов. Такой подход к организации потока ошибок естественным образом соответствует природе образования ошибок в реальных каналах преобразования данных. Кроме того, корректное определение длин пакетов ошибок в составной модели источника ошибок позволяет максимально полно использовать корректирующие свойства кодов при согласовании длин кодовых комбинаций и пакетов ошибок, исправляемых кодами

Ключевые слова: дискретные каналы, модели ошибок, независимые ошибки, пакеты ошибок, цепочки пакетов ошибок

Введение

В общем случае ошибки реальных дискретных каналов преобразования данных имеют, как правило, зависимый, коррелированный характер, что определяет их стремление к образованию пакетов.

Статистические данные [1, 2] определяют наиболее общие особенности реальных каналов преобразования данных:

1. Вероятность возникновения длинных пакетов ошибок меньше, чем коротких пакетов;
2. Средняя вероятность ошибки на бит информации для различных каналов преобразования различна;
3. Длины пакетов ошибок определяются геометрическим законом распределения.

Методы математического моделирования потока ошибок с целью определения параметров корректирующих кодов, максимально согласованных с вероятностными характеристиками ошибок в каналах преобразования данных, наиболее распространены в настоящее время.

Согласование параметров корректирующих кодов и вероятностных характеристик ошибок

пользование логической избыточности кодовых комбинаций кода [3] для наиболее полной коррекции независимых и пакетных ошибок различной длины при всех вероятностях появления.

Понятно, что коррекции должны подлежать, в первую очередь, те каналные ошибки, которые имеют максимальную вероятность появления на длине кодовой комбинации.

Максимальной вероятностью появления обладают ошибки, появляющиеся в пределах как одиночных пакетов ошибок, так и пакетов, объединенных в цепочки пакетов.

Для сравнения обобщенные статистические данные определяют средние вероятности появления независимых каналных ошибок на уровне $P_e \leq 5 \cdot 10^{-2} - 5 \cdot 10^{-5}$, а пакетные ошибки могут появляться с вероятностью $\epsilon \geq 5 \cdot 10^{-2} - 5 \cdot 10^{-1}$ [4].

Отсюда видно, что вероятность появления пакетных ошибок значительно выше вероятности появления независимых ошибок.

Очевидно следует вывод о необходимости исправления пакетных ошибок в пределах кодовых комбинаций корректирующих кодов,

поскольку вероятность их появления превышает вероятности независимых (квазинезависимых) канальных ошибок.

Кроме того, длина пакета ошибок, либо их цепочки в общем случае, должна быть согласована с длиной кодовой комбинации корректирующего для их полного исправления в пределах кодовых комбинаций.

Задача состоит в разработке модели источника ошибок, генерирующего независимые (фоновые) канальные и зависимые (пакетные) ошибки с длиной, согласованной с размером кодовой комбинации, что позволит обеспечить максимально полное исправление этих ошибок.

Такой подход к построению модели ошибок задает целенаправленный выбор соответствующего корректирующего кода.

Основная часть

Известные модели каналов Гильберта, Попова и Турина, Беннета-Фройлиха [5] в различной степени имитируют механизм образования потока ошибок, адекватный естественному процессу появления ошибок в реальных каналах преобразования данных.

Однако, все указанные модели не учитывают зависимый характер ошибок в пакетах и не способствуют их согласованию с размером кодовой комбинации корректирующего кода, предлагающего исправление в целом пакетов ошибок в пределах длины кодовой комбинации, и не обеспечивают рекомендации по выбору конкретного метода коррекции.

Максимально обобщенный способ описания потока ошибок в канале положен в основу модели [6], обладает следующими свойствами:

1. Для организации потока ошибок различных уровней зависимости в виде последовательностей цепочек пакетов использован способ сжатия фоновых ошибок.

2. Расчет параметров модели не сложно выполнить на основе экспериментальных данных.

3. Предложенный многоуровневый механизм образования ошибок схож естественному процессу появления ошибок в канале преобразования.

Предложенная обобщенная модель [6] в большей степени соответствует требованию простоты аналитических выражений и допускает простую программную реализацию.

Последовательность ошибок в обобщенных моделях каналов разбиваются на отрезки двух типов – цепочки пакетов ошибок и промежутки между ними, причем ошибки возникают как в пакетах с вероятностью ε , так и в промежутках между цепочками ошибок при средней вероятности ошибки на бит P_e .

Как правило, $\varepsilon > P_e$, причем длины пакетов l и промежутков λ подчиняются одномерным распределениям $P(l)$ и $P(\lambda)$, что полностью задает статистику ошибок при независимых длинах пакетов l и длинах промежутков λ [5].

Принципиальным для обобщенной модели [6] является то, что в промежутках между пакетами ошибки невозможны, а сами они являются совокупностью независимых ошибок, появляющихся с вероятностью $\varepsilon < 0,5$.

Обобщение модели канала предусматривает реализацию следующих основных положений.

1. Фоновые ошибки, порождаемые каналом при независимом механизме их появления с вероятностью P_e , происходят на всех участках такого обобщенного канала, в том числе и в промежутках между пакетами ошибок.

Кроме того, наличие пакетных ошибок не должно исключать возможности появления фоновых канальных ошибок в пределах цепочек пакетов.

2. Механизм организации пакетов ошибок и их цепочек подобен обобщенной модели, описанной в [5], т. е. механизм образования коррелированных участков осуществляется путем объединения (сжатия) фоновых ошибок. Такой механизм организации пакетов ошибок задает их коррелированность по определению, что не отражено в обобщенной модели.

Таким образом, прослеживается необходимость реализации как канала с независимыми ошибками, появляющихся с вероятностью P_e , так и канала пакетных ошибок и цепочек пакетов ошибок с заданными вероятностными характеристиками.

3. Механизмом взаимодействия фоновых и пакетных ошибок служит процедура аддитивного объединения каналов с независимыми и пакетными ошибками путем посимвольного сложения по логическому «или» соответствующих ошибочных бит этих двух каналов.

Посимвольное сложение осуществляется таким образом, что ошибки в составном кана-

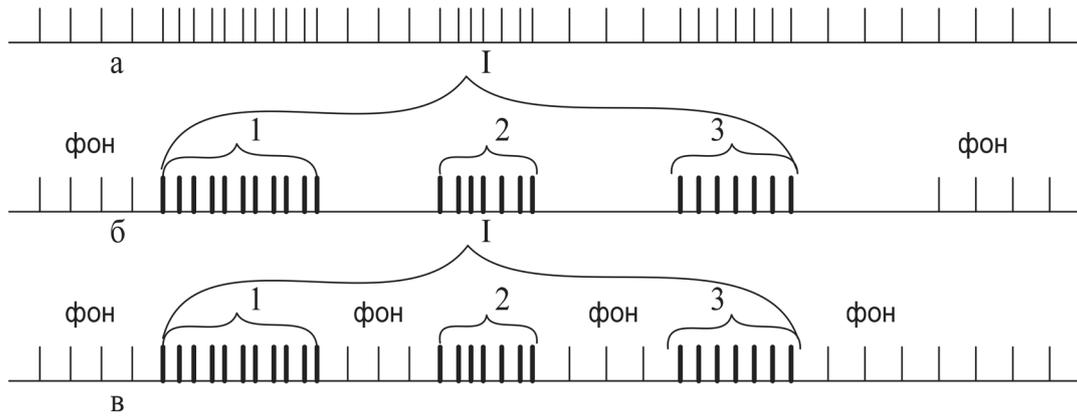


Рис. 1. Схема объединения каналов: *а* – канал с независимыми ошибками, *б* – обобщенный канал с пакетными ошибками, *в* – составной канал, *1–3* – пакеты ошибок, *I* – цепочка пакетов ошибок, фон – участок независимых ошибок

ле появляются тогда, когда они имеют место либо в канале с независимыми ошибками или с пакетными ошибками, либо в обоих каналах одновременно.

Схема объединения каналов с независимыми ошибками и обобщенного канала с пакетными ошибками, представлен на рис. 1, соответствует составной модели источника ошибок.

Фоновые каналные ошибки обладают слабой коррелированностью, т. е. практически независимы (квазинезависимы). Появление канальных ошибок с большей вероятностью способствует увеличению их коррелированности и объединению в пакеты.

Известные модели, подразумевающие независимый характер появления фоновых и пакетных ошибок, явно не предназначены для согласованного использования канала и корректирующих кодов, поскольку большинство кодов не в состоянии исправлять достаточно длинные пакеты ошибок в целом из-за отсутствия согласования длин пакетов ошибок и объема кодовых комбинаций.

Пакетные ошибки уверенно исправляются при использовании структурно-логических кодов (СЛК), поскольку их высокая логическая избыточность и возможность организации объемных кодовых комбинаций позволяет согласовать пакетные ошибки и коды СЛК [7].

Составной канал находится в состоянии, при котором на фоне независимых ошибок, возникающих с вероятностью P_e , с вероятностью $P_{ц}$ могут появиться цепочки пакетов ошибок. В пределах цепочки пакетов могут возникнуть один или более пакетов ошибок.

В предлагаемой составной модели источника ошибок фоновые независимые ошибки появляются везде, за исключением пакетов ошибок (*1–3* рис. 1).

В отличие от обобщенной модели ошибок [6], в которой в пределах цепочек пакетов наряду с пакетами ошибок в обязательном порядке присутствуют и полностью безошибочные интервалы, составная модель источника ошибок не содержит безошибочных интервалов.

Составная модель (рис. 1, *в*), содержит только пакеты ошибок (*1–3*), объединенные в цепочки пакетов (*I*), и участки фоновых ошибок между пакетами.

Таким образом, построение составной модели источника ошибок основывается на следующих положениях.

1. Для определения состояния канала, т. е. наличия в канале фоновых ошибок, либо цепочки пакетов ошибок, производится сравнение текущего значения случайного числа α , генерируемого источником случайных чисел, и вероятностью возникновения цепочки пакетов $P_{ц}$.

Если

$$P_{ц} \geq \alpha, \quad (1)$$

то возникнет цепочка пакетов.

А если

$$P_{ц} < \alpha, \quad (2)$$

то присутствует фон независимых ошибок.

2. При нахождении канала в состоянии фона независимых ошибок, если

$$P_e \geq \alpha, \quad (3)$$

то возникает ошибка фона, т. е. единичный бит в последовательности ошибок.

При

$$P_e < \alpha, \quad (4)$$

ошибка в фоновой последовательности отсутствует, что отмечается нулевым битом в последовательности ошибок.

3. Как показано в [6], длины цепочек пакетов ошибок при геометрическом распределении определяются как

$$l_{\text{ц}} = \left[\frac{\ln(1-\alpha)}{\ln g_{\text{ц}}} \right] + 1, \quad (5)$$

где

$$g_{\text{ц}} = \frac{1}{l_{\text{ц}}}, \quad (6)$$

Здесь $\bar{l}_{\text{ц}}$ – средняя длина цепочки пакетов, определяемая опытным путем.

4. Пакеты ошибок возникают только в пределах цепочки пакетов.

В общем случае распределение длин пакетов ошибок l^{∇} подчиняется полигеометрическому закону, представляющего собой сумму геометрических распределений. При этом длины пакетов l^{∇} могут принимать значения нескольких типов. Для упрощения процесса моделирования источника ошибок считаем, что присутствуют пакеты только одного типа.

При этом, как показано в [6], длины пакетов ошибок определяются как

$$l^{\nabla} = \left[\frac{l(1-\alpha)}{\ln \gamma} \right] + 1, \quad (7)$$

где

$$\gamma = 1 - \frac{1}{l^{\nabla}}, \quad (8)$$

Под \bar{l}^{∇} понимается средняя длина пакета ошибок, определяемая опытным путем.

5. Пакетные ошибки появляются только в пределах пакета при выполнении условия

$$\varepsilon \geq \alpha, \quad (9)$$

Здесь ε является средней вероятностью ошибки в пакете.

6. Процесс возникновения пакетов ошибок в пределах цепочек основан на принципе сжатия во времени фоновых ошибок [6]. При таком перераспределении ошибок организуется коррелированный поток в пределах пакетов,

возникающих независимо на фоне канальных ошибок, возникающих также независимо.

7. При непосредственном посимвольном представлении ошибок соотношение между основными параметрами составной модели ошибок определяются как [5]:

$$P_e = \varepsilon P_{\text{ц}} P_{\text{пц}} \bar{l}_{\text{ц}} \bar{l}^{\nabla}, \quad (10)$$

где P_e – средняя вероятность ошибки в канале; ε – вероятность появления ошибки в пределах пакета коррелированных ошибок; $P_{\text{ц}}$ – вероятность возникновения цепочек пакетов; $P_{\text{пц}}$ – вероятность возникновения пакетов ошибок в пределах цепочки пакетов; $\bar{l}_{\text{ц}}$ – средняя длина цепочки пакетов ошибок; \bar{l}^{∇} – средняя длина пакета ошибок.

Средние длины цепочек пакетов и пакетов ошибок ($\bar{l}_{\text{ц}}$ и \bar{l}^{∇} соответственно), определяются на основе экспериментальных данных, а вероятности P_e , ε , $P_{\text{ц}}$, $P_{\text{пц}}$ – на основе статистических данных.

Таким образом, последовательность операций при реализации составной модели ошибок на основе пунктов 1–7, потактно представляется следующей блок-схемы (рис. 2).

После задания параметров канала P_e , ε , $P_{\text{ц}}$, $P_{\text{пц}}$, $\bar{l}_{\text{ц}}$, \bar{l}^{∇} и размера общего массива данных n , задаются начальные условия функционирования источника ошибок k , k_1 , k_2 .

Также задаются начальные значения цепочек и пакетов $l_{\text{ц}}$ и l^{∇} соответственно.

Затем выбирается число α_k , выданное генератором случайных чисел. Далее текущее значение номера k числа α_k сопоставляется с границей цепочки пакетов k_1 . Если текущее значение такта k находится в пределах цепочки пакетов ($k \leq k_1$), то, в соответствии с вероятностью возникновения цепочки пакетов $P_{\text{ц}}$, определяется длина цепочки $l_{\text{ц}}$. В пределах цепочки пакетов k_1 возможно возникновение пакетов ошибок с вероятностью $P_{\text{пц}}$. После определения длины возникшего пакета ошибок l^{∇} находятся пределы пакета k_2 .

Если текущее значение такта k находится в пределах пакета ($k \leq k_2$), то определяется возможность возникновения пакетных ошибок с вероятностью ε . При превышении тактом k пределов цепочки пакетов k_1 ($k > k_1$), возможно появление новой цепочки пакетов, в противном случае возникают фоновые ошибки с вероятностью P_e . При превышении теку-

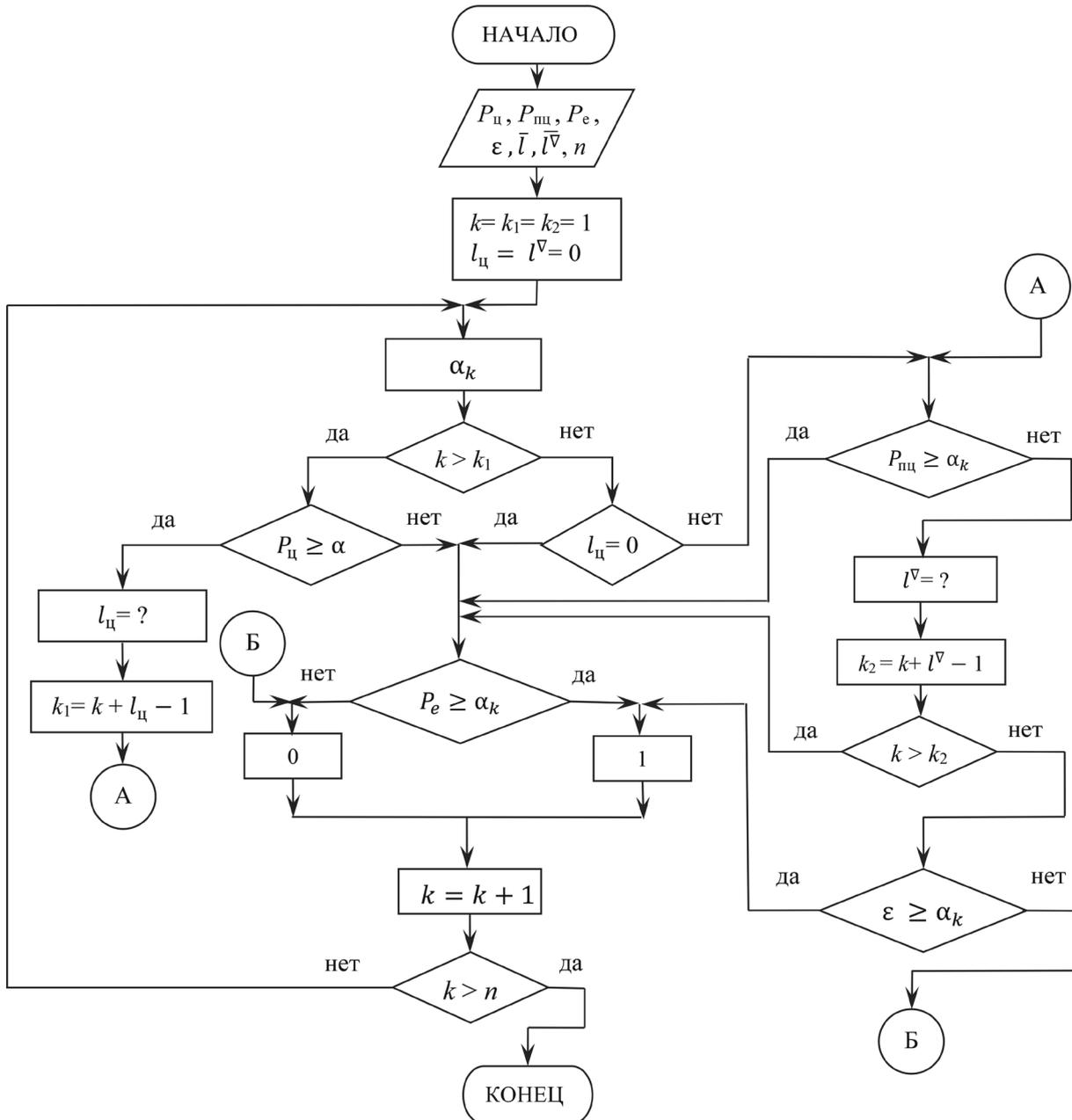


Рис. 2. Блок-схема алгоритма формирования потока ошибок для составной модели канала

щего значения k пределов пакета ошибок k_2 , возникают фоновые ошибки. Во всех случаях между пакетами ошибок возникают фоновые ошибки, как в пределах цепочки пакетов k_1 , так и вне ее.

Таким образом, ошибки с вероятностью ε возникают только в пределах пакета l^V , а за пределами пакетов присутствует фон независимых ошибок, возникающих с вероятностью P_e . Это основная отличительная черта предлагаемой составной модели источника ошибок.

Заключение

В работе рассмотрены положения реализации модели реальных дискретных каналов преобразования данных. С учетом недостатков существующих моделей источников ошибок разработана составная модель, объединяющая свойства независимых канальных (фоновых) и пакетных (коррелированных) ошибок, возникающих с большей вероятностью, чем средняя вероятность в канале преобразования.

Подробно представлен алгоритм определения состояния составного канала ошибок, от-

вечающий естественному процессу появления ошибок в реальном канале преобразования. Определенные параметры составной модели канала такие как: средняя вероятность ошибки P_e , длины цепочек пакетов ошибок $l_{ц}$, длины пакетов ошибок l^{∇} , вероятность пакетной ошибки ε , позволяют корректно согласовать канал

преобразования и корректирующий пакетные ошибки код. В качестве такого кода исправляющего пакетные ошибки, может быть использован код СЛК [7].

Разработанная составная модель источника ошибок может быть достаточно просто реализована программно.

Литература

1. **Пуртов Л. П.** Элементы теории передачи дискретной информации / Л. П. Пуртов [и др.] – Москва: Связь, 1972. – 232 с.
2. **Blow, G. M.** Archival Life of Tellurium-Based Materials for Optical Recording/ G. M. Blow, D. Y. Lou // J. of the Electrochemical Society. – 1984. Vol.131, № 1. – P. 146–154.
3. **Крушный В. В.** Основы теории информации и кодирования / В. В. Крушный – Снежинск: СГФТА, 2005, – 160 с.
4. **Певнев, В. Я.** Сравнительный анализ скорости работы помехоустойчивых кодов [Текст] / В. Я. Певнев, М. В. Цуранов // Теоретические и прикладные проблемы информационной безопасности: тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф. (Минск, 21 июня 2012 г.) / М-во внутр. дел Респ. Беларусь, учреждение образования «Акад. М-ва внутр. дел Респ. Беларусь». – Минск: Акад. МВД, 2012. – С. 153–156
5. **Блох, Э. Л.** Модели источника ошибок в каналах передачи цифровой информации / Э. Л. Блох, О. В. Попов, В. Я. Турин, – Москва: Связь, 1971. – 312 с.
6. **Иванов, Ю. Д.** Моделирование потока ошибок в дискретном канале на основе принципа сжатия / Ю. Д. Иванов, И. В. Павлич. – Сборник научных трудов ОЭИС. Эффективные системы связи. – Одесса, 1988. – С.71–74.
7. **Иванов Ю. Д.** Метод структурно-логического кодирования инфимумных дизъюнктивных нормальных форм булевых функций в базе куба E^n / Ю. Д. Иванов, И. В. Пампуха, О. С. Захарова, Г. Б. Жиров. – Сборник научных работ Военного института Киевского национального университета им. Т. Шевченка, 2008 – С. 46–49.

References

1. **Purtov L. P.** Jelementy teorii peredachi diskretnoj informacii / L. P. Purtov [i dr.] – Moskva.: Svjaz', 1972. – 232 s.
2. **Blow, G. M.** Archival Life of Tellurium-Based Materials for Optical Recording/ G. M. Blow, D. Y. Lou // J. of the Electrochemical Society. – 1984. Vol.131, № 1. – P. 146–154.
3. **Krushnyj V. V.** Osnovy teorii informacii i kodirovanija / V. V. Krushnyj – Snezhinsk: SGFTA, 2005, –160 s.
4. **Pevnev, V. Ya., Tsuranov, M. V.** Sravnitel'nyi analiz skorosti raboty pomekhoustoichivykh kodov [Comparative analysis of the speed of error-correcting codes] Teoreticheskie i prikladnye problemy informatsionnoi bezopasnosti: tez. dokl. Mezhdunar. nauch.- prakt. konf. (Minsk, 21 iyunya 2012 g.) [Theoretical and applied problems of information security: proc. Dokl. Intern. scientific.-practical. Conf. (Minsk, June 21, 2012)], Minsk, Akad. MVD Publ., 2012, pp. 153–156.
5. **Bloh, Je. L.** Modeli istochnika oshibok v kanalah peredachi cifrovoj informacii / Je. L. Bloh, O. V. Popov, V. Ja. Turin, – Moskva: Svjaz', 1971. – 312 s.
6. **Ivanov, Ju. D.** Modelirovanie potoka oshibok v diskretnom kanale na osnove principa szhatija/ Ju. D. Ivanov, I. V. Pavlich. – Sbornik nauchnyh trudov OJeIS. Jeffektivnye sistemy svjazi. – Odessa, 1988. – S.71–74.
7. **Ivanov Ju. D.** Metod strukturno-logicheskogo kodirovanija infimumnyh dizjunktivnyh normal'nyh form bulevykh funkcij v baze kuba E^n / Ju. D. Ivanov, I. V. Pampuha, O. S. Zaharova, G. B. Zhirov. – Sbornik nauchnyh rabot Voennogo instituta Kievskogo nacional'nogo universiteta im. T. Shevchenka, 2008 – S. 46–49.

Поступила
09.08.2016

После доработки
14.09.2016

Принята к печати
15.09.2016

Y. Ivanov, B. Lozka, E. Kozljuk

COMPOSITE MODEL ERROR SOURCES IN DISCRETE CHANNELS OF DATA CONVERSION

Designed component model of the source of errors in real discrete channels of data conversion, based on the joint use of the channel within dependent generalized errors and channel with correlated errors pack image on the background of independent errors. Organization of burst errors in a channel based on the generalized implementation of the principle of compression of individual sections of the background in dependent error that causes the formation of plots, completely free of errors. The presence of such sites in infallible conversion channel does not reflect the actual processes of errors, which leads to the need to share the channel with generalized packet errors and channel errors independent background that provides the background presence of errors in all areas except the packet. Such an approach to error

stream naturally corresponds to the nature of the formation of errors in real data conversion channels. In addition to this, the correct determination of the length of burst errors in the composite model of the source of the error allows maximum use of corrective properties of the codes with the concurrence of the lengths of codewords and error packets, correctable codes.

Keywords: discrete channels, error model, independent error, error packets, error packets chains



Иванов Юрий Дмитриевич окончил Киевский институт инженеров гражданской авиации в 1965 году по специальности радиоинженер. Кандидат технических наук по специальности «Компьютерные системы».

Преподаватель Института информационной безопасности, радиоэлектроники и телекоммуникаций Одесского национального политехнического университета, доцент кафедры информационных технологий проектирования в электронике и телекоммуникациях.

Научные интересы включают в себя вопросы помехоустойчивого кодирования нетрадиционной логики, цифровая фильтрация, каналы преобразования дискретных данных теория алгоритмов.

Yuri D. Ivanov graduated from the Kiev Institute of Civil Aviation Engineers in 1965 with a degree in radio engineering. Candidate of Technical Sciences on a specialty «Computer systems».

Teacher Information Security Institute of Radio Electronics and Telecommunications Odessa National Polytechnic University, assistant professor of information design technologies in electronics and telecommunications.

His research interests include issues of error-correcting coding unconventional logic, digital filtering, digital TV conversion data the theory of algorithms.



Лозка Богдан Владимирович родился в 1992 году. Получил степень специалиста (с отличием) по специальности «Информационные технологии проектирования» в 2014 году в Одесском национальном политехническом университете, Украина.

С 2015 года является аспирантом по специальности «Компьютерные системы и компоненты», работает программистом.

Научные интересы включают в себя методы имитационного моделирования информационных систем, теория алгоритмов, дискретная обработка информационных данных.

Lozka Bogdan Vladimirovich was born in 1992. He holds a professional (with honors), specialty «aided design engineer» in 2014 at the Odessa National Polytechnic University, Ukraine.

From 2015, she is a graduate student in the specialty «Computer systems and components», works a programmer. His research interests include methods of simulation modeling of information systems, the theory of algorithms, discrete processing information data.



Козлюк Евгения Олеговна родилась в 1992 году. Получила степень магистра в 2016 году в Одесском национальном политехническом университете, Украина.

Научные интересы: технологии проектирования, алгоритмы повышения помехоустойчивости и надежности систем передачи информации, каналы преобразования дискретных данных.

Работает программистом-разработчиком.

Kozlyuk Eugene O. was born in 1992. He received a master's degree in 2016 at the Odessa National Polytechnic University, Ukraine.

Research interests: design technology, algorithms improve noise immunity and reliability of data transmission systems, digital data conversion channels.

It works as a programmer-developer.