

УДК 621.395

РАЗРАБОТКА МНОГОКАНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ МОДИФИКАЦИИ АЛГОРИТМА ХУРГИНА – ЯКОВЛЕВА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ОТСЧЕТОВ СИГНАЛА И ЕГО ТРЕХ ПЕРВЫХ ПРОИЗВОДНЫХ

В. Т. Дмитриев, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой РУС РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0001-5521-6886, e-mail: vol77@rambler.ru

Ву Хоанг Шон, аспирант кафедры РУС РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0009-0004-7428-5296, e-mail: vuhoangson.adaf@gmail.com

Предложена и исследована модификация алгоритма Хургина – Яковлева при четырехканальной реализации, основанная на представлении речевого сигнала в виде прореженных в четыре раза отсчетов сигнала и его трех первых производных. Показаны возможности параллельной обработки отсчетов сигнала и проведена оценка помехоустойчивости системы, созданной на основе предложенного алгоритма. Проведено сравнение помехоустойчивости системы передачи на основе модификации алгоритма Хургина – Яковлева при использовании отсчетов сигнала и его трех первых производных с системой, построенной на основе теоремы В. А. Котельникова. Проведены экспериментальные исследования алгоритмов первичного кодирования речевых сигналов на основе предложенного алгоритма с различным количеством каналов. По сравнению с системами на основе теоремы В. А. Котельникова показано, что выигрыш в качестве восстановленного речевого сигнала при наличии шума в канале передачи с вероятностью битовой ошибки от 0,1 до 5 % составляет от 0,2 до 1,4 балла согласно шкале MOS для алгоритмов кодирования с низкой скоростью, от 0,2 до 1,8 балла для кодеков со средней скоростью и до 1,6 балла для алгоритмов кодирования с высокой скоростью.

Ключевые слова: модификация алгоритма Хургина – Яковлева, теорема отсчетов, обработка речевых сигналов, первичные кодеки, каналы связи, фильтры, объективное качество речи, ViSQOL.

DOI: 10.21667/1995-4565-2025-91-24-35

Введение

В последнее время наблюдается рост использования новых технологий в области систем связи, что приводит к значительным изменениям в процессе цифровой обработки речевых сигналов (РС). Оцифровка речи включает в себя дискретизацию и квантование. Минимальная частота дискретизации ограничивается теоремой отсчетов В.А. Котельникова, а количество уровней квантования обычно определяется требуемым качеством сигнала на приемной стороне. Для систем передачи речи эти два ограничения приводят к начальной скорости передачи данных 64 кбит/с в системах на основе импульсно-кодовой модуляции (ИКМ) при использовании компадирования динамического диапазона. Такая скорость неэффективна с точки зрения использования канала для современных систем передачи речевой информации.

Достижения в области фиксированных и мобильных телекоммуникационных систем подчеркивают важность снижения скорости передачи при обеспечении приемлемого качества восстановленной речи. В результате, первичное кодирование речи и предварительная обработка РС в первичном кодеке стали важными областями исследований. Однако при этом возникают проблемы, связанные с достижением компромисса между качеством восстановленной речи и низкой скоростью передачи, что является сложной вычислительной задачей. Решение данной задачи требует применения все более сложных алгоритмов кодирования РС. Реализация таких алгоритмов в режиме реального времени проблематична, поскольку для этого необходимы высокоскоростные процессоры, что связано как с большими экономиче-

скими затратами, так и со значительным энергопотреблением. При этом применение таких алгоритмов может привести к задержке сигналов и к утере пакетов при передаче РС.

Для достижения больших значений коэффициента сжатия и, соответственно, низких скоростей передачи данных необходимо передавать параметры генерации речи и шаблоны восприятия, которые обладают высокой чувствительностью к искажениям канала. Системы, использующие такие речевые кодеки, часто функционируют в условиях значительного ослабления сигнала, что создает серьезные проблемы в поддержании приемлемого качества речи при передаче по причине чувствительности параметров в неблагоприятных условиях. Оценка этих параметров может быть затруднена из-за искажения сигнала шумами в канале связи, что ведет к значительному ухудшению качества восстановленной речи.

Для преодоления указанных проблем необходимо разработать систему кодирования РС, которая обеспечит высокое качество восстановленной речи при экономичном использовании канала связи и обеспечении заданной помехоустойчивости. Одним из решений является первичное кодирование РС с использованием модификации алгоритма Хургина – Яковлева.

Цель данной работы состоит в разработке методов обработки и кодирования речи, основанных на представлении РС на основе модификации алгоритма Хургина – Яковлева. Проведено сравнение эффективности различных алгоритмов первичного кодирования РС, основанных на предложенной модификации, с различным количеством каналов для передачи отсчетов сигнала и его производных.

Теоретическая часть

На основе теоремы отсчетов В. А. Котельникова [1] российские ученые Я. И. Хургин и В.П. Яковлев показали [2], что при передаче сигнала с ограниченным спектром $x(t)$ можно использовать значения сигнала и его $(N-1)$ производных в виде отсчетов с дискретными частотами, равными $2F/N$ (где F – верхняя частота спектра сигнала). Количество информации о сигнале, получаемое в единицу времени, т. е. среднее количество данных на единицу времени, характеризующих однозначно сигнал $x(t)$, и в этом случае сохраняется равным количеству данных, определяемых теоремой В. А. Котельникова, но информация содержится не только в значениях сигнала, но также и в значениях его производных.

Общее представление алгоритма Хургина – Яковлева может быть записано следующим образом [2]:

$$x(t) = \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{k!} x^{(k)}(NnT) (t - NnT)^k \left[\frac{\sin \pi(t / NT - n)}{\pi(t / NT - n)} \right]^N, \quad (1)$$

где T – период дискретизации сигнала, установленный согласно теореме В.А. Котельникова; не должен превышать $1/2F$; $x^{(k)}(NnT)$ – отсчетное значение k -й производной сигнала $x(t)$ взятой через равные временные интервалы NT .

Формулу (1) с математической точки зрения можно рассматривать как сумму N интерполированных рядов, k -й из которых имеет композиционную функцию [2]:

$$h_{n,k}(t) = (t - NnT)^k \left[\frac{\sin \pi(t / NT - n)}{\pi(t / NT - n)} \right]^N. \quad (2)$$

С точки зрения разработки системы передачи и обработки сигналов формулу (1) можно понимать следующим образом: для передачи сигнала $x(t)$, спектр которого сосредоточен в интервале $(-\pi/T; \pi/T)$, нужны отсчетные значения сигнала $x(NnT)$ и его первых $(N-1)$ производных $x'(NnT)$, $x''(NnT)$, ..., $x^{(N-1)}(NnT)$ через равные временные интервалы NT . Эти отсчеты кодируются в виде коротких импульсов, площадь которых пропорциональна $x^{(k)}(NnT)/k!$, и передаются по N каналам соответственно.

На выходе приемника имеется N синтезирующих фильтров, имеющих импульсные переходные функции $h_{n,k}(t)$ ($k = 0, 1, \dots, N-1$) вычисляемые по формуле (2) в N различных ка-

налах, и некоторое коммутационное устройство, подключающее последовательно выход приемника на вход этих фильтров таким образом, что на синтезирующий фильтр с номером k поступает импульс, соответствующий отсчету, взятому в момент $t_{n,k}$. Выходы всех фильтров объединяются в сумматоре, обеспечивая восстановленный сигнал $\hat{x}(t)$.

Синтезирующие фильтры с импульсными переходными функциями (2) представляют собой полосовые фильтры с верхней граничной частотой $F = \pi / T$ (но с различными амплитудно-фазовыми характеристиками). Для получения частотной характеристики этих фильтров необходимо выполнить преобразование Фурье функции $h_{n,k}(t)$.

Таким образом, согласно формуле (1), алгоритм Хургина – Яковлева допускает параллельную обработку отсчетов сигналов и их $(N-1)$ производных, передающихся в виде прореженных в N раз отсчетов по N каналам. В рамках данного исследования мы рассмотрим систему передачи РС с количеством каналов от одного $N = 1$ до четырех $N = 4$.

Учитывая первый случай $N = 1$, формула (1) принимает следующий вид [1]:

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(nT) \left[\frac{\sin \pi(t/T - n)}{\pi(t/T - n)} \right].$$

Эта формула определяет теорему В. А. Котельникова, что приводит к утверждению, что она является частным случаем алгоритма Хургина – Яковлева при $N = 1$ [2...7].

При двухканальной реализации $N=2$, формула (1) имеет следующий вид:

$$x(t) = x_1(t) + x_2(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(2nT) \operatorname{sinc}^2 \left[\pi(t/2T - n) \right] + \sum_{n=-\infty}^{\infty} x'(2nT)(t - 2nT) \operatorname{sinc}^2 \left[\pi(t/2T - n) \right]. \quad (3)$$

Метод обработки сигналов, основанный на формуле (3), осуществляется следующим образом: передаваемый сигнал $x(t)$ обладает финитным спектром, ограниченным в диапазоне $(-\pi/T; \pi/T)$. С интервалом времени $2T$ выбираются отсчетные значения сигнала $x(t)$ и его первой производной $x'(t)$. Эти значения передаются в виде коротких импульсов (амплитуды импульсов пропорциональны соответствующим величинам) по двум отдельным каналам. На приемном конце они подаются на соответствующие синтезирующие фильтры с импульсными переходными функциями, задаваемыми следующими формулами:

– для отсчетов сигнала:

$$h_{n,1}(t) = \left[\frac{\sin \pi(t/2T - n)}{\pi(t/2T - n)} \right]^2, \quad (4)$$

– для отсчетов первой производной сигнала:

$$h_{n,2}(t) = (t - 2nT) \left[\frac{\sin \pi(t/2T - n)}{\pi(t/2T - n)} \right]^2. \quad (5)$$

Фазочастотные характеристики (ФЧХ) упомянутых выше синтезирующих фильтров (4) и (5) неопределены, что приводит к ошибкам при восстановлении сигнала на основе алгоритма Хургина – Яковлева, ограничивая его применимость в практических задачах [3, 7]. Для решения данной проблемы предложена модификация алгоритма, направленная на уменьшение погрешности восстановления сигнала за счет коррекции ФЧХ обеспечивающих более точное восстановление РС в системе связи и использования методов аппроксимации для вывода универсального уравнения амплитудно-частотных характеристики (АЧХ) синтезирующих фильтров.

АЧХ $A(f)$ и ФЧХ $\Phi(f)$ синтезирующих фильтров, полученные после модификации алгоритма Хургина – Яковлева, имеют вид [3, 7]:

$$A_1(f) = 2(1 - f/F), \quad \Phi_1(f) = 0.$$

$$A_2(f) = \begin{cases} 0, & \text{при } f = 0; F, \\ 2/\pi, & \text{при } f \neq 0; F, \end{cases}, \quad \Phi_2(f) = \begin{cases} 0, & \text{при } f = 0; F, \\ -\pi/2, & \text{при } f \neq 0; F. \end{cases}$$

Аналогично полученные для $N = 2$, формы АЧХ и ФЧХ синтезирующих фильтров строятся и модифицируются при $N = 3$ и $N = 4$ следующим образом.

При $N = 3$ АЧХ и ФЧХ синтезирующих фильтров после модификации имеют следующий вид [6]:

$$A_1(f) = 2,22 + 1,25(f/F) - 16,27(f/F)^2 + 20,45(f/F)^3 - 7,67(f/F)^4,$$

$$\Phi_1(f) = 0.$$

$$A_2(f) = \begin{cases} 4,26(f/F) & \text{при } f \leq 0,36F \\ -2,15(f/F) + 2,15 & \text{при } 0,36F < f \leq F, \end{cases}$$

$$\Phi_2(f) = \begin{cases} -\pi/2 & \text{при } f \leq F \\ \pi/2 & \text{при } F < f \leq 2F. \end{cases}$$

$$A_3(f) = \begin{cases} 1,37 & \text{при } f \leq 0,36F \\ 0,69 & \text{при } 0,36F < f \leq F, \end{cases}$$

$$\Phi_3(f) = \begin{cases} -\pi & \text{при } f \leq F \\ \pi & \text{при } F < f \leq 2F. \end{cases}$$

При $N = 4$, система представляет собой четырехканальную систему передачи информации, использующая для передачи прореженные отсчеты сигнала и первых его трех производных.

$$A_1(f) = 2,65 + 0,71(f/F) - 21,79(f/F)^2 + 31,54(f/F)^3 - 13,13(f/F)^4.$$

$$\Phi_1(f) = 0.$$

$$A_2(f) = -0,08 + 12,32(f/F) - 21,68(f/F)^2 + 12,22(f/F)^3 - 1,34(f/F)^4.$$

$$\Phi_2(f) = \begin{cases} -\pi/2 & \text{при } f \leq F, \\ \pi/2 & \text{при } F < f \leq 2F. \end{cases}$$

$$A_3(f) = \begin{cases} -9,72(f/F) & \text{при } f \leq 0,33F, \\ 9,33(f/F) - 3,05 & \text{при } 0,33F < f \leq 0,5F, \\ -3,24(f/F) + 3,24 & \text{при } 0,5F < f \leq F. \end{cases}$$

$$\Phi_3(f) = \begin{cases} -\pi & \text{при } f \leq F, \\ \pi & \text{при } F < f \leq 2F. \end{cases}$$

$$A_4(f) = \begin{cases} 3,09 & \text{при } f \leq 0,5F, \\ 1,03 & \text{при } 0,5F < f \leq F. \end{cases}$$

$$\Phi_4(f) = \begin{cases} \pi/2 & \text{при } f \leq F, \\ -\pi/2 & \text{при } F < f \leq 2F. \end{cases}$$

Формы АЧХ и ФЧХ синтезирующих фильтров после модификации показаны на рисунке 1.

На основе метода обработки сигналов предложенного Я. И. Хургиным и В. П. Яковлевым, описанного формулой (1), возможно разработать обобщенную структурную схему системы передачи и обработки сигналов, представленную на рисунке 2.

На входе системы передачи исходный сигнал дискретизируется с частотой, определяемой теоремой В.А. Котельникова, в результате чего формируется дискретный сигнал $x(n)$. В N -канальной системе $(N-1)$ каналов содержат дифференциатор (Д) с целью получения отсчетов производных k -го порядка ($k = 1, \dots, N-1$). Дифференциатор (Д) функционирует согласно

следующему алгоритму: сначала производится быстрое преобразование Фурье отсчетов сигнала, затем отсчеты спектра умножаются на $(j2\pi f)^k$ и выполняется обратное быстрое преобразование Фурье [8]. После этого полученные дискретные отсчеты сигнала и его производных поступают в дециматор ($\downarrow N$), где они прореживаются в N раз, затем квантуются (КВ), передаются на кодер (КОД) и далее в канал связи (КС).

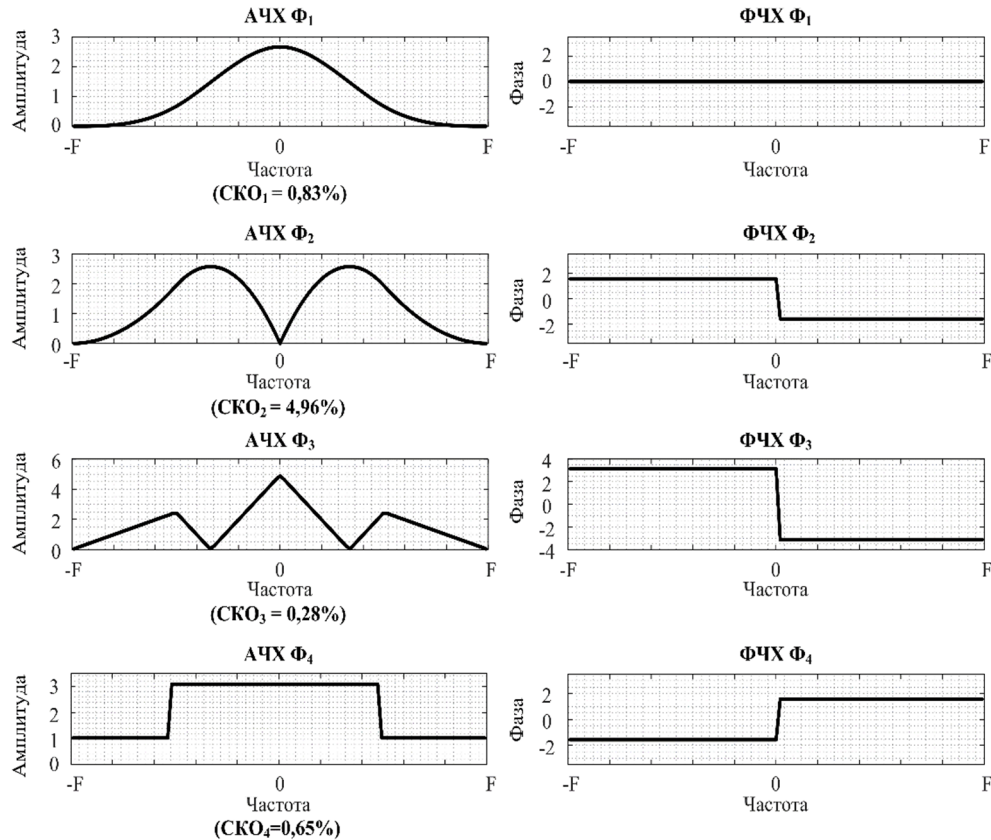


Рисунок 1 – АЧХ и ФЧХ синтезирующих фильтров после модификации алгоритма

Хургина – Яковлева при четырехканальной реализации

Figure 1 – Amplitude-frequency characteristic and phase-frequency characteristic of synthesizing filters after modification of the Khurgin – Yakovlev algorithm with four-channel implementation

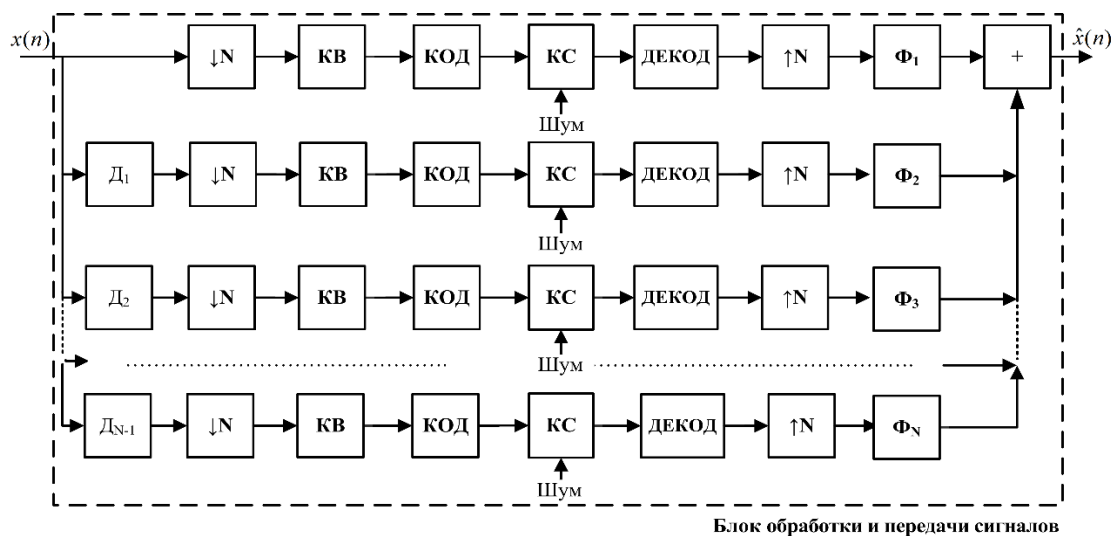


Рисунок 2 – Обобщенная структурная схема системы обработки и передачи сигналов на основе модификации алгоритма Хургина – Яковлева при N канальной реализации

Figure 2 – General structural diagram of signal processing and transmission system based on the modification of the Khurgin – Yakovlev algorithm with N-channel implementation

После канала связи закодированные отсчеты поступают в N -канальный приемник. В декодере (ДЕКОД) происходит процедура декодирования согласно алгоритму первичного кодирования и затем передаются в интерполятор ($\uparrow N$). На выходе интерполятора получаем отсчеты сигнала и отсчеты первой, второй, ... и $(N-1)$ производных. Эти отсчеты затем подаются на соответствующие синтезирующие фильтры, АЧХ и ФЧХ которых показаны ранее (7)...(15). Далее отсчеты поступают в сумматор (+), где происходит восстановление исходного сигнала $\hat{x}(n)$.

Анализ процесса обработки и передачи РС согласно обобщенной структурной схеме, приведенной выше, показывает, что точное восстановление сигнала с конечным спектром не может быть осуществлено по следующим причинам: ошибки, возникающие при вычислении производной; ошибки из-за неопределенных ФЧХ и аппроксимации АЧХ синтезирующих фильтров. Данные ошибки вызваны неидеальными синтезирующими фильтрами и ошибками квантования. Кроме того, искажения сигнала происходят при кодировании и передаче по каналам связи, что существенно влияет на качество восстановленного РС. Для количественной оценки качества восстановленных сигналов проведем экспериментальные исследования предложенной системы передачи на основе модификации алгоритма Хургина – Яковлева при различном числе каналов $N = 2, 3, 4$.

Описание эксперимента

Экспериментальные исследования по оценке качества речи проводились по упрощенной функциональной схеме, представленной на рисунке 3.

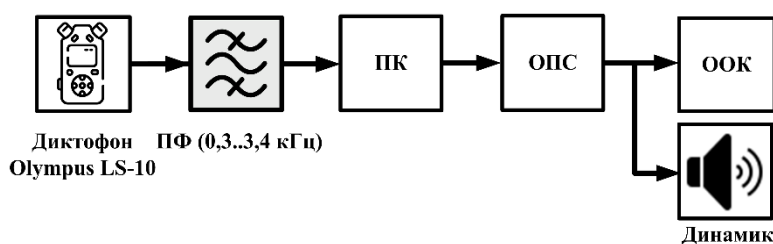


Рисунок 3 – Упрощенная функциональная схема процесса экспериментального исследования
Figure 3 – Simplified functional diagram of experimental research process

Тестовые фразы согласно ГОСТ Р 50840-95 [9] использовались в качестве речевого материала. Различные дикторы начитывали речевой материал в специально оборудованном помещении, соответствующем требованиям MOS. Для записи речевого материала использовались профессиональные диктофоны, такие как Olympus LS-10 и Zoom H4n, которые широко применяются в практических исследованиях. Диктофон Olympus LS-10 обеспечивает запись в формате «.wav» с частотой дискретизации 44,1 кГц, разрядностью 16 бит и использованием ИКМ-кодирования. В свою очередь, Zoom H4n поддерживает запись с расширенными характеристиками: частота дискретизации до 96 кГц, разрядность 24 бита и возможность выбора между ИКМ- и MP3-кодированием. Оба устройства использовались для обеспечения высокой точности и качества записи в условиях, соответствующих требованиям MOS (Mean Opinion Score).

Записанный на диктофон речевой сигнал проходит через полосовой фильтр (ПФ) с полосой пропускания $(0,3...3,4)$ кГц, после чего преобразуется программным конвертером (ПК) с частотой дискретизации 8, 16, 24 или 32 кГц в зависимости от того, является ли используемая многоканальная система одноканальной, двухканальной, трехканальной или четырехканальной соответственно. После завершения преобразования частоты сигнал поступает в блок обработки и передачи сигналов (ОПС), структурная схема которого представлена на рисунке 2. В данном блоке сигнал обрабатывается по модифицированному алгоритму Хургина – Яковлева, представленному выше. С выхода блока ОПС восстановленный речевой сигнал направляется к динамику, где осуществляется субъективная оценка качества РС, а также в

блок объективной оценки качества (ООК), основанный на модели ViSQOL (Virtual Speech Quality Objective Listener) [10]. Расчет показателя качества ViSQOL основан на различиях между двумя сигналами, которые обычно выражаются в виде средней оценки мнений MOS по шкале от 1 до 5. Этот показатель отражает степень ухудшения качества между исходной и восстановленной речью.

Экспериментальные исследования

Рассмотрим качество восстановленной речи на выходе системы на основе модификации алгоритма Хургина – Яковлева при реализации с различным количеством каналов передачи в случае использования одного и того же первичного кодека без ошибок в канале связи. Первичное кодирование и декодирование РС основано на стандартных алгоритмах, разделенных на три группы: кодеки с низкой скоростью (кодек ММБЕ со скоростью передачи 1,2 кбит/с и 2,4 кбит/с; кодек LBRAMR со скоростью передачи 1,2 кбит/с и 2,4 кбит/с); кодеки со средней скоростью (кодек G.723.1 со скоростью передачи 5,3 кбит/с; кодек G.729a со скоростью передачи 8 кбит/с; кодек ICELP со скоростью передачи 4,8 кбит/с и 6 кбит/с); кодеки с высокой скоростью (кодек G.728i со скоростью передачи 16 кбит/с; кодек G.726 со скоростями передачи 16 кбит/с, 32 кбит/с, 40 кбит/с).

В данной работе качество восстановленной речи оценивается с использованием объективной модели ViSQOL [10]. Оценка качества определяется путем усреднения значений, полученных для 10 различных входных РС, соответствующих требованиям ГОСТ Р 50840-95 и ГОСТ Р 51061-97 [9, 11]. Результаты оценки качества восстановленной речи систем на основе модификации алгоритма Хургина – Яковлева с реализацией двухканального K_{x2} , трехканального K_{x3} и четырехканального K_{x4} сравниваются между собой и с системой, основанной на теореме В.А. Котельникова K_1 , по показателям выигрышей качества восстановленной речи $\Delta K_2 = K_{x2} - K_1$, $\Delta K_3 = K_{x3} - K_1$, $\Delta K_4 = K_{x4} - K_1$ приведенным в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение качества восстановленной речи систем на основе модификации алгоритма Хургина – Яковлева при реализации различного количества каналов и с различными алгоритмами первичного кодирования

Table 1 – Comparison of restored speech quality in the systems based on the modification of the Khurgin – Yakovlev algorithm when implementing a different number of channels and with different primary coding algorithms

№	Кодек	На основе теоремы Котельникова (K_I)	На основе модификации алгоритма Хургина – Яковлева					
			$N = 2$		$N = 3$		$N = 4$	
			K_{X2}	ΔK_2	K_{X3}	ΔK_3	K_{X4}	ΔK_4
Кодек с низкой скоростью кодирования								
1	ММБЕ 1,2 кбит/с	3,62	3,98	0,36	4,29	0,67	4,48	0,86
2	LBRAMR 1,2 кбит/с	3,70	4,02	0,32	4,32	0,62	4,47	0,77
3	ММБЕ 2,4 кбит/с	3,79	3,99	0,20	4,32	0,53	4,50	0,71
4	LBRAMR 2,4 кбит/с	3,82	4,05	0,23	4,33	0,51	4,49	0,67
Кодек со средней скоростью кодирования								
5	ICELP 4,8 кбит/с	3,65	3,80	0,15	4,28	0,63	4,54	0,89
6	G.723.1 5,3 кбит/с	3,76	3,98	0,22	4,32	0,56	4,57	0,81
7	ICELP 6 кбит/с	3,72	3,87	0,15	4,30	0,58	4,57	0,85
8	G.729a 8 кбит/с	3,99	4,04	0,05	4,35	0,36	4,60	0,61
Кодек с высокой скоростью кодирования								
9	G.728i 16 кбит/с	4,09	4,27	0,18	4,39	0,30	4,56	0,47
10	G.726 16 кбит/с	3,54	4,12	0,58	4,39	0,85	4,56	1,02
11	G.726 32 кбит/с	4,45	4,50	0,05	4,51	0,06	4,63	0,18
12	G.726 40 кбит/с	4,56	4,52	-0,06	4,51	-0,05	4,64	0,08

Из анализа таблицы 1 видно, что при первичном кодировании РС на низких и средних скоростях первичных кодеков системы, построенные на модификации алгоритма Хургина – Яковлева с различным количеством каналов, достигают выигрыша по сравнению с системой, основанной на теореме В.А. Котельникова. При одном и том же типе кодирования увеличение количества каналов приводит к увеличению выигрыша качества восстановленной речи. Таким образом, наибольший выигрыш достигается в четырехканальной системе.

Произведем оценку помехоустойчивости предложенного алгоритма для различного количества каналов обработки N при воздействии помех в канале связи. В известной литературе проанализирована помехоустойчивость системы передачи на основе модификации алгоритма Хургина – Яковлева [3, 5, 7], где объясняется, что причина заключается в характеристиках алгоритма, используемых отсчетах сигналов и их производных. Эти особенности создают ортогональную систему, что значительно уменьшает влияние шумов в канале связи на систему. Помехоустойчивость системы показана через зависимость качества восстановленной речи от вероятности возникновения ошибок (ОШ, %) в канале передачи. Выигрыш помехоустойчивости системы обработки при использовании предложенного алгоритма по сравнению с аналогичной системой обработки, основанной на теореме В.А. Котельникова, для низкоскоростных, среднескоростных и высокоскоростных первичного кодирования представлен на рисунках 4 – 6.

Зависимости выигрыша для низкоскоростных кодеков показаны на рисунке 4.

При использовании низкоскоростных первичных алгоритмов кодирования со скоростью передачи в диапазоне от 1,2 до 2,4 кбит/с, система на основе модификации алгоритма Хургина – Яковлева обеспечивает выигрыш по помехоустойчивости в диапазоне от 0,2 до 1,4 балла по шкале MOS по сравнению с аналогичной системой, основанной на теореме В.А. Котельникова. Например кодек ММВЕ 1,2 кбит/с обеспечивает наибольший выигрыш помехоустойчивости: ΔK_2 от 0,3 по 0,8 балла по шкале MOS для двухканальных систем, ΔK_3 от 0,5 до 1,2 балла по шкале MOS для трехканальных систем и ΔK_4 от 0,8 по 1,4 балла по шкале MOS для четырехканальных систем на основе модификации алгоритма Хургина – Яковлева.

Зависимости выигрыша для среднескоростных кодеков показаны на рисунке 5. Для среднескоростных первичных типов кодирования со скоростью передачи от 4,8 по 8 кбит/с, система на основе модификации алгоритма Хургина – Яковлева обеспечивает выигрыш по помехоустойчивости в диапазоне от 0,2 до 1,8 балла по шкале MOS. Наибольший выигрыш обеспечивает кодек ICELP 4,8 кбит/с, обеспечивающий выигрыш по помехоустойчивости: ΔK_2 от 0,2 по 1,0 балла по шкале MOS для двухканальных систем, ΔK_3 от 0,6 по 1,5 балла по шкале MOS для трехканальных систем и ΔK_4 от 0,8 до 1,8 балла по шкале MOS для четырехканальных систем.

Зависимости выигрыша для высокоскоростных кодеков показаны на рисунке 6. Для высокоскоростных первичных алгоритмов кодирования со скоростью передачи от 16 по 40 кбит/с система на основе модификации алгоритма Хургина – Яковлева обеспечивает выигрыш по помехоустойчивости в диапазоне от 0 до 1,6 балла по шкале MOS. В частности, кодек G.726 по-прежнему обеспечивает выигрыш по помехоустойчивости, но выигрыш снижается по мере увеличения скорости передачи данных. Лучшим из них является кодек G.728i 16 кбит/с, обеспечивающий выигрыш по помехоустойчивости: ΔK_2 от 0,1 по 0,8 балла по шкале MOS для двухканальных систем, ΔK_3 от 0,1 по 1,5 балла по шкале MOS для трехканальных систем и ΔK_4 от 0,2 по 1,6 балла по шкале MOS для четырехканальных систем.

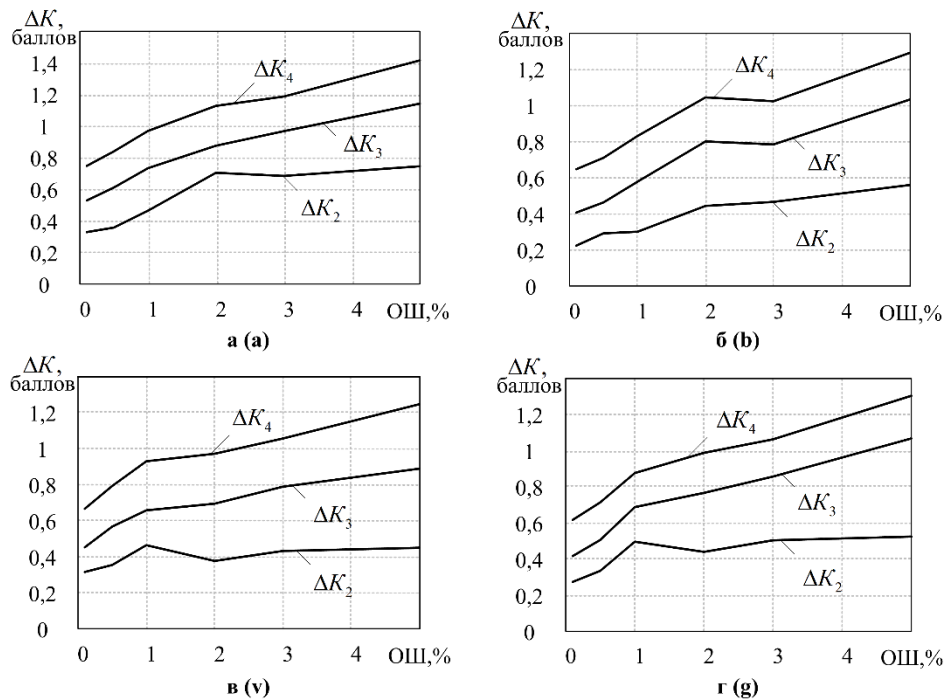


Рисунок 4 – Выигрыш помехоустойчивости системы передачи на основе модификации алгоритма Хургина – Яковлева при использовании низкоскоростных алгоритмов кодирования: MMBE 1,2 кбит/с (а), MMBE 2,4 кбит/с (б), LBRAMR 1,2 кбит/с (в), и LBRAMR 2,4 кбит/с (г)

Figure 4 – Gain in noise immunity of transmission system based on the modification of the Khurgin – Yakovlev algorithm when using low-speed coding algorithms: MMBE 1.2 kbps (a), MMBE 2.4 kbps (b), LBRAMR 1.2 kbps (v), and LBRAMR 2.4 kbps (g)

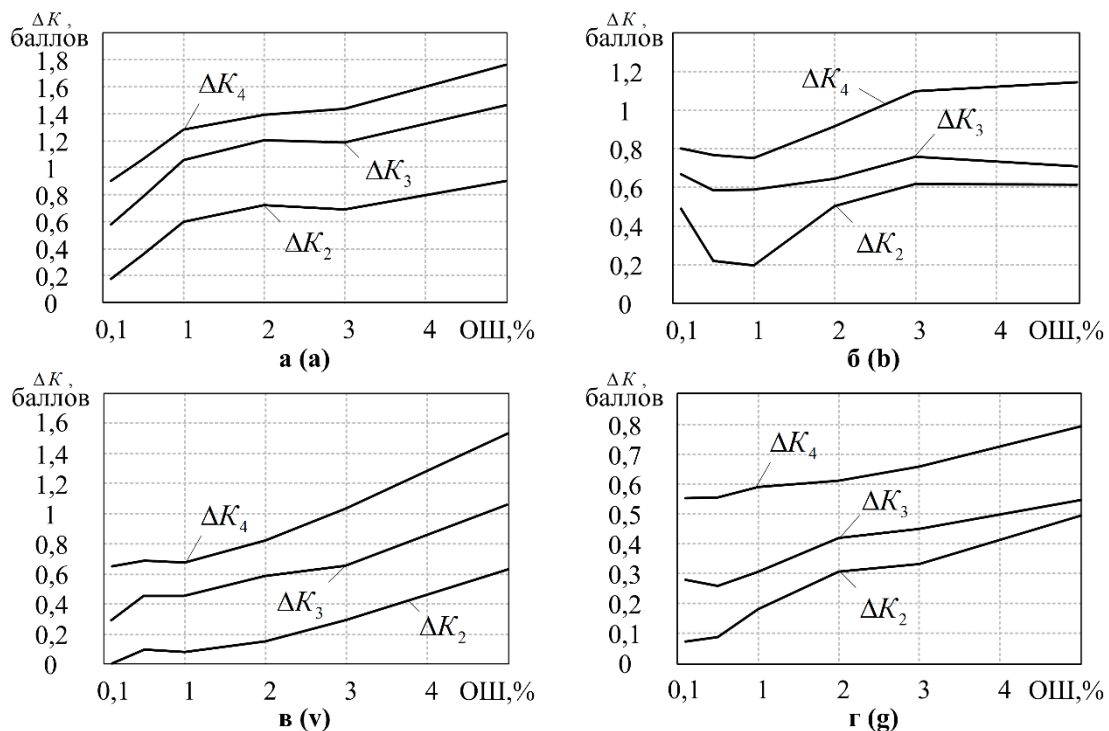


Рисунок 5 – Выигрыш помехоустойчивости системы передачи на основе модификации алгоритма Хургина – Яковлева

при использовании среднескоростных алгоритмов кодирования:

ICELP 4,8 кбит/с (а), G.723.1 5,3 кбит/с (б), ICELP 6 кбит/с (в), и G.729a 8 кбит/с (г)

Figure 5 – Gain in noise immunity of the transmission system based on the modification of the Khurgin – Yakovlev algorithm when using medium-speed coding algorithms:

ICELP 4.8 kbps (a), G.723.1 5.3 kbps (b), ICELP 6 kbps (v), and G.729a 8 kbps (g)

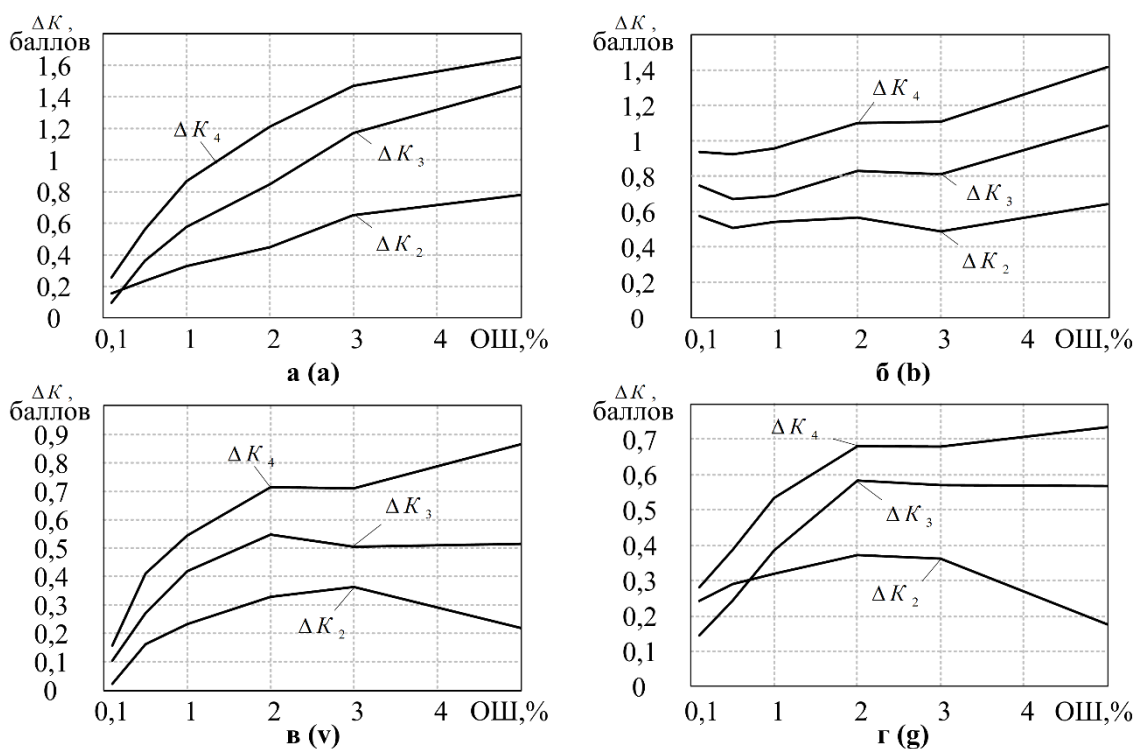


Рисунок 6 – Выигрыш помехоустойчивости системы передачи на основе модификации алгоритма Хургина – Яковлева при использовании высокоскоростных алгоритмов кодирования: G.728i 16 кбит/с (а), G.726 16 кбит/с (б), G.726 32 кбит/с (в), и G.726 40 кбит/с (г)

Figure 6 – Gain in noise immunity of the transmission system based on the modification of the Khurgin – Yakovlev algorithm when using high-speed coding algorithms: G.728i 16 кбит/с (а), G.726 16 кбит/с (б), G.726 32 кбит/с (в), и G.726 40 кбит/с (г)

Заключение

Таким образом, в данной работе разработана и исследована система передачи РС на основе предложенной модификации алгоритма Хургина – Яковлева, включающая корректировку частотных характеристик синтезирующих фильтров, построение многоканальной системы передачи и обработки сигналов, а также проведение экспериментальных исследований, связанных с алгоритмами первичного кодирования. Проведена оценка качества восстановленной речи путем сравнения эффективности первичных кодеков, использующих модифицированный алгоритм при разном числе каналов, с системами, основанными на теореме В.А. Котельникова, при использовании одного и того же первичного кодера.

В результате экспериментальных исследований показано, что предложенная модификация увеличивает помехоустойчивость передачи речевой информации и улучшает качество воспроизведения речи по сравнению с существующими системами, основанными на теореме В.А. Котельникова. В условиях действия помех в канале связи применение разработанного алгоритма в сочетании с низкоскоростным кодированием при скоростях передачи в диапазоне от 1,2 до 2,4 кбит/с приводит к повышению качества восстановленной речи на 0,2...1,4 балла. При использовании среднескоростного кодирования при скоростях передачи РС от 4,8 до 8 кбит/с, качество восстановления повышается на 0,2...1,8 балла, а при использовании высокоскоростного кодирования при скоростях передачи от 16 до 40 кбит/с – на 0...1,6 балла по шкале MOS.

Библиографический список

1. **Котельников В.А.** О пропускной способности эфира и проволоки в электросвязи – Всесоюзный энергетический комитет // Материалы к I Всесоюзному съезду по вопросам технической реконструкции дела связи и развития слаботочной промышленности. 1933.

2. Хургин Я.И., Яковлев В.П. Методы теории целых функций в радиофизике, теории связи и оптике. М.: Государственное издательство физико-математической литературы. 1962. 220с.
3. Кириллов С.Н., Дмитриев В.Т. Реализационные возможности и помехоустойчивость процедуры восстановления сигналов на основе алгоритма Хургина – Яковлева // Радиотехника. 2003. № 1. С. 73-75.
4. Дмитриев В.Т. Адаптация кодеков речевых сигналов на основе теоремы В.А. Котельникова и модификации алгоритма Хургина – Яковлева к шумам в канале связи // Цифровая обработка сигналов. 2023. № 2. С. 55-60.
5. Дмитриев В.Т., Смирнов М.С. Исследование помехоустойчивой и защищенной системы передачи речевых сигналов на основе представления Хургина – Яковлева // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2022. № 82. С. 27-37.
6. Дмитриев В.Т., Ву Хоанг Шон Применение трёхканальной модификации алгоритма Хургина – Яковлева в алгоритмах первичного кодирования речевых сигналов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2024. № 88. С. 3-14.
7. Дмитриев В.Т. Помехоустойчивость кодеков речи на основе алгоритма Хургина – Яковлева // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2003. № 12. С.133-136.
8. Бахурин С.А, Дмитриев В.Т. Исследование точности алгоритмов оценки отсчетов производной в радиотехнических устройствах // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2004. №1 3. С.32-35.
9. ГОСТ Р 50840-95. Передача речи по трактам связи. Методы оценки качества, разборчивости и узнаваемости. М.: Изд-во стандартов. 1995. 60 с.
10. Hines A., Skoglund J., Kokaram A., Harte N. ViSQOL: The Virtual Speech Quality Objective Listener. Acoustic Echo Noise Control (IWAENC) // IEEE Intl. Workshop on, IEEE Aachen, Germany. 2012, pp. 1-4.
11. ГОСТ Р 51061-97. Системы низкоскоростной передачи речи по цифровым каналам. Параметры качества речи и методы измерений. М.: Госстандарт России. 1997. 21 с.
12. Дмитриев В.Т. Адаптация кодека CELP к воздействию акустических помех // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2021. № 76. С.25-34.
13. Кириллов С.Н., Дмитриев В.Т. Устойчивость первичных кодеков речевых сигналов на основе представления Хургина – Яковлева к действию акустических шумов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2019. № 3. С.17-25.
14. Кириллов С.Н., Дмитриев В.Т. Adaptive Primary Speech Signals Codecs for Software-Configured Radio Systems // 1st International Conference Problems of Informatics, Electronics, and Radio Engineering (PIERE). 2020. Pp. 32-38 DOI: 10.1109/PIERE51041.2020.9314648.
15. Дмитриев В.Т., Лукьянов Д.И. Алгоритм маскирования на основе представления Хургина – Яковлева с использованием производных второго и третьего порядков // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2012. № 42-1. С.13-17.

UDK 621.395

DEVELOPMENT OF MULTICHANNEL SYSTEM BASED ON THE MODIFICATION OF THE KHURGIN – YAKOVLEV ALGORITHM USING SIGNAL SAMPLES AND ITS FIRST THREE DERIVATIVES

V. T. Dmitriev, Dr. Sc. (Tech.), Radio Control and Communication Department, Head of department, RSREU, Ryazan, Russia;
orcid.org/0000-0001-5521-6886, e-mail: vol77@rambler.ru
Vu Hoang Son, post-graduate student RSREU, Ryazan, Russia;
orcid.org/0009-0004-7428-5296, e-mail: vuhoangson.adaf@gmail.com

A modification of the Khurgin-Yakovlev algorithm for four-channel implementation, based on speech signal representation in the form of downsampled samples of a signal and its first three orders of derivatives is proposed and investigated. The possibilities of parallel processing of signal samples are demonstrated, and an evaluation of system error resilience created on the basis of the proposed algorithm is performed. A com-

parison of error resilience of the transmission system based on the modification of the Khurgin-Yakovlev algorithm using signal samples and its first three orders of derivatives with a system built on the basis of Kotelnikov's theorem is carried out. Experimental studies of primary speech signal coding algorithms based on the proposed algorithm with different numbers of channels are conducted. Compared to the systems based on Kotelnikov's theorem, the authors show that the gain in restored speech signal quality in the presence of noise in transmission channel with bit error probability from 0,1 to 5 % amounts from 0,2 to 1,4 points according to Mean Opinion Score (MOS) scale for low-rate coding algorithms, from 0,2 to 1,8 points for medium-rate codecs, and up to 1,6 points for high-rate coding algorithms.

Keywords: modification of the Khurgin – Yakovlev algorithm, sampling theorem, speech signal processing, primary codecs, communication channels, filters, objective speech quality, ViSQOL.

DOI: 10.21667/1995-4565-2025-91-24-35

References

1. **Kotelnikov V.A.** O propusknoj sposobnosti efira i provoloki v elektrosvyazi – Vse-soyuznyj energeticheskij komitet. *Materialy k I Vsesoyuznomu s"ezdu po voprosam tekhnicheskoy rekonstrukcii dela svyazi i razvitiya slabotochnoj promyshlennosti*. 1933. (in Russian).
2. **Khurgin Ya.I., Yakovlev V.P.** *Metody teorii celykh funktsij v radiofizike, teorii svyazi i optike* (Methods of the theory of entire functions in radiophysics, communication theory and optics). Moscow: Gosudarstvennoe izdatel'stvo fiziko-matematicheskoy literatury. 1962, 220 p. (in Russian).
3. **Kirillov S.N., Dmitriev V.T.** Realizacionnye vozmozhnosti i pomekhoustoichivost' procedury vostanovleniya signalov na osnove algoritma Hurgina – Yakovleva. *Radiotekhnika*. 2003, no. 1, pp. 73-75. (in Russian).
4. **Dmitriev V.T.** Adaptatsiya kodekov rechevyh signalov na osnove teoremy V.A. Kotelnikova i modifikatsii algoritma Hurgina – Yakovleva k shumam v kanale svyazi. *Cifrovaya obrabotka signalov*. 2023, no. 2, pp. 55-60. (in Russian).
5. **Dmitriev V.T., Smirnov M.S.** Issledovanie pomekhoustoichivoy i zashchishchennoy sistemy peredachi rechevyh signalov na osnove predstavleniya Hurgina – Yakovleva. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2022, no. 82, pp. 27-37. (in Russian).
6. **Dmitriev V.T., Vu Hoang Son** Primenenie tryokanal'noy modifikatsii algoritma Hurgina – Yakovleva v algoritmah pervichnogo kodirovaniya rechevyh signalov. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2024, no. 88, pp. 3-14. (in Russian).
7. **Dmitriev V.T.** Pomekhoustoichivost' kodekov rechi na osnove algoritma Hurgina – Yakovleva. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2003, no. 12, pp. 133-136. (in Russian).
8. **Bakhurin S.A., Dmitriev V.T.** Issledovanie tochnosti algoritmov ocenki otschetov proizvodnoy v radiotekhnicheskikh ustroystvakh. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2004, no. 13, pp. 32-35. (in Russian).
9. GOST R 50840-95. *Peredacha rechi po traktam svyazi. Metody ocenki kachestva, razborchivosti i uznavaemosti*. Moscow: Izd-vo standartov. 1995, 60 p. (in Russian).
10. **Hines A., Skoglund J., Kokaram A., Harte N.** ViSQOL: The Virtual Speech Quality Objective Listener. Acoustic Echo Noise Control (IWAENC). *IEEE Intl. Workshop on*, IEEE Aachen, Germany. 2012, pp. 1-4.
11. GOST P 51061-97. *Sistemy nizkoskorostnoy peredachi rechi po cifrovym kanalam. Parametry kachestva rechi i metody izmerenij*. Moscow: osstandart Rossii. 1997. 21 p. (in Russian).
12. **Dmitriev V.T.** Adaptatsiya kodeka CELP k vozdeystviyu akusticheskikh pomekh. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2021, no. 76, pp. 25-34. (in Russian).
13. **Kirillov S.N., Dmitriev V.T.** Ustoichivost' pervichnyh kodekov rechevyh signalov na osnove predstavleniya Hurgina – Yakovleva k deystviyu akusticheskikh шумов. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2019, no. 3, pp. 17-25. (in Russian).
14. **Kirillov S.N., Dmitriev V.T.** Adaptive Primary Speech Signals Codecs for Software-Configured Radio Systems. *1st International Conference Problems of Informatics, Electronics, and Radio Engineering (PIERE)*. 2020. Pp. 32-38 DOI: 10.1109/PIERE51041.2020.9314648.
15. **Dmitriev V.T., Lukyanov D.I.** Algoritm maskirovaniya na osnove predstavleniya Hurgina – Yakovleva s ispol'zovaniem proizvodnyh vtorogo i tret'ego poryadkov. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2012, no. 42-1, pp. 13-17. (in Russian).