

УДК 621.395

## АДАПТИВНЫЙ АЛГОРИТМ КОДИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ КОДЕКА CELP И МОДИФИКАЦИИ АЛГОРИТМА ХУРГИНА – ЯКОВЛЕВА

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

**С. Ю. Лантратов**, студент РГРТУ Рязань, Россия  
orcid.org/0009-0004-7428-5296, e-mail: sergeylantratov2000lsu@gmail.com

*Разработан и исследован адаптивный к искажениям в канале связи алгоритм кодирования речевых сигналов на основе кодека CELP и модификации алгоритма Хургина – Яковлева. Цель работы: разработка и исследование алгоритма адаптации кодека CELP к воздействию искажений в канале связи. В работе это достигается путем выбора отдельных совокупностей параметров кодека CELP, обеспечивающих при воздействии искажений в канале связи более высокое качество речевых сигналов на выходе кодека. Проведено исследование влияния параметров на качество речи на выходе кодека CELP на основе теоремы В.А. Котельникова и представления Хургина – Яковлева.*

**Ключевые слова:** речевой сигнал, помехоустойчивость, алгоритм Хургина – Яковлева, качество речи, кодек CELP.

**DOI:** 10.21667/1995-4565-2024-88-21-30

### Введение

С развитием средств телекоммуникации появилась необходимость совершенствования алгоритмов сжатия речевых сигналов (РС). В современных системах передачи, в том числе при передаче РС, имеются ограничения частотного ресурса, которые приводят к взаимоисключающим требованиям снижения избыточности передаваемого сообщения и увеличения качества восстановленной речи на приеме. Для решения данной проблемы разработан широкий класс алгоритмов первичного кодирования РС.

В настоящее время известно большое количество различных алгоритмов кодирования РС. Одни из самых популярных это: АДИКМ (адаптивная дифференциальная импульсно-кодовая модуляция), MELP (Mixed-excitatuon linear prediction – линейное предсказание со смешанным возбудителем), LPC (Linear Predictive Coding – линейное прогнозирующее кодирование), CELP (Code Excited Linear Prediction – линейное предсказание с мультикодовым управлением). Данные алгоритмы кодирования построены на основе методов представления и адаптации передаваемых параметров.

Среди данных алгоритмов первичного кодирования наилучшее качество восстановленной речи при необходимой для современных систем передачи избыточности передаваемой информации и соответствующей ей скорости передачи обеспечивает алгоритм CELP. Данный алгоритм нашел свое применение. В то же время возможно дальнейшее снижение избыточности передаваемой информации на основе различных представлений РС.

Снижение избыточности в низкоскоростных кодеках зачастую приводит к снижению качества передаваемой речи [1]. Существует ряд факторов, которые являются причиной искажения передачи цифрового РС, что, в свою очередь, снижает качество восстановленной речи на приемной стороне. Такими факторами являются: ошибки квантования (ограничение в количестве уровней квантования), битовые ошибки, потеря пакетов/кадров, проскальзывание (появление дубликатов пакетов/кадров из-за ошибки синхронизации) [2, 3].

Рассмотрим представление РС в виде отсчетов сигнала и его производных. Возможность такого представления была указана в работах К. Шеннона [4], но в общем виде разработана в работах Хургина Я.И. и Яковлева В.П. [5] Данное представление обеспечивает представле-

ние РС в виде прореженных отсчетов сигнала и его  $N-1$  производных. Такое представление обеспечивает не только возможность параллельной обработки, но и повышение помехоустойчивости и качества восстановленной речи, а также более простую реализацию синтезирующих фильтров. К основным недостаткам алгоритма Хургина – Яковлева можно отнести ошибку восстановления фазового спектра, которая приводит к искажению восстановленного РС. Предложена модификация алгоритма Хургина – Яковлева, обеспечивающая уменьшение ошибки восстановления сигнала [6]. Показано, что применение данной модификации обеспечивает повышение качества восстановленной речи в первичных кодеках на выходе декодера. Целью работы является исследование кодека CELP (рекомендация G.728) на основе модификации алгоритма Хургина – Яковлева в условиях искажения в канале связи.

### Постановка задачи

В данной работе предложена модификация первичного кодека CELP на основе рекомендации G.728 и на основе модификации алгоритма Хургина – Яковлева. Модификация заключается в том, что исходный РС в блоке входного преобразования Хургина – Яковлева осуществляется дифференцированием отсчетов сигнала и децимацией отсчетов сигнала и производной, а в кодеках сигнала и производной осуществляется кодирование прореженных отсчетов сигнала и его первой производной. Использование данной модификации кодека CELP позволит передавать РС с минимальной избыточностью и при этом сохранить хорошее качество, а применение модификации алгоритма Хургина – Яковлева позволит повысить помехоустойчивость сигнала [6, 7]. На рисунке 1 показана структурная схема моделируемой системы передачи РС на основе кодека CELP, построенного на основе модификации алгоритма Хургина – Яковлева.

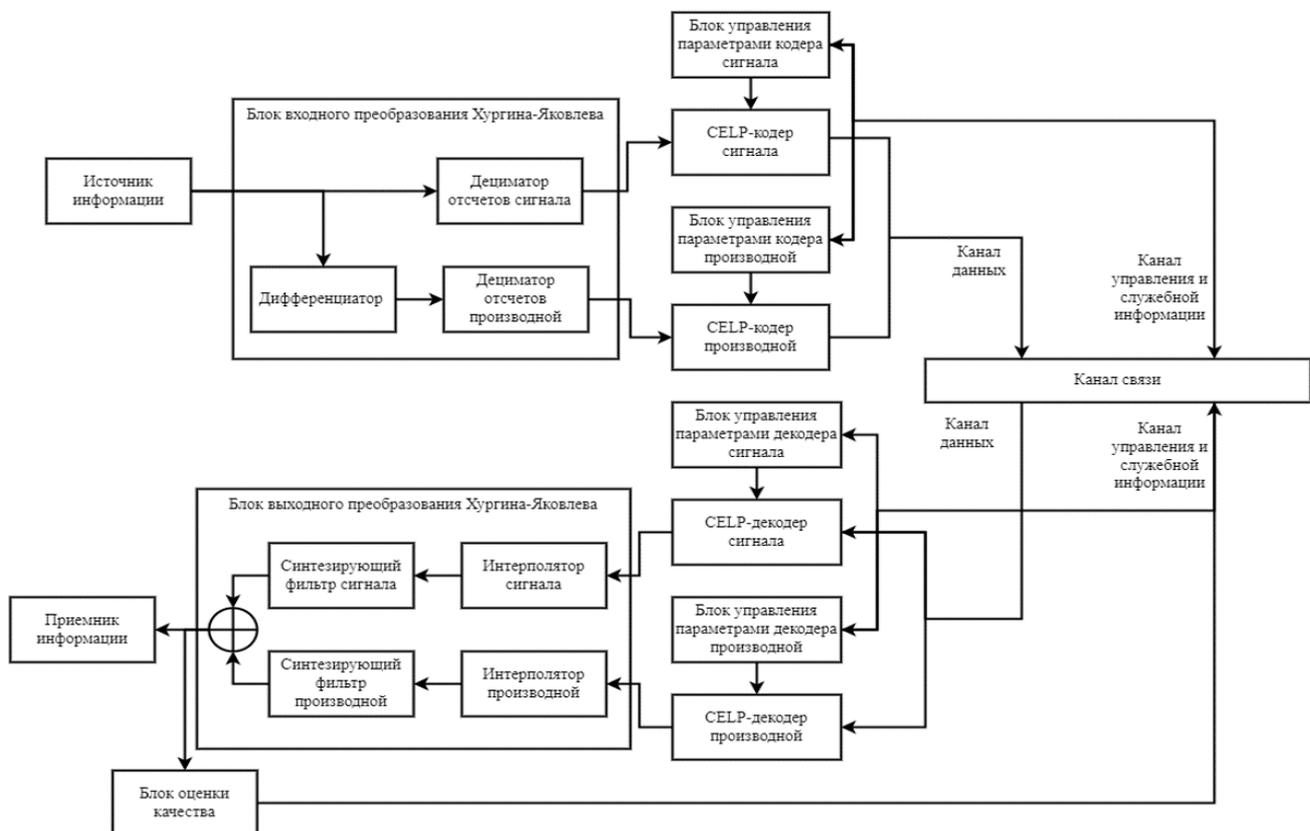


Рисунок 1 Структурная схема системы передачи речевой информации  
Figure 1 – Block diagram of speech information transmission system

На приведенной схеме рассмотрена совместная работа модификации алгоритма Хургина – Яковлева и кодека CELP. Схема включает в себя: источник информации, блоки преобра-

зования Хургина – Яковлева в кодере и декодере, кодек CELP, блок оценки качества PESQ, блоки управления параметрами кодека и канал связи.

Принцип работы данной схемы заключается в следующем. От источника информации РС поступает на вход кодера, построенного на основе модификации алгоритма Хургина – Яковлева. В дифференциаторе вычисляется производная сигнала, а в дециматоре происходит снижение частоты передаваемого сигнала в два раза. Прореженные отсчеты сигнала и его первой производной передаются на независимые CELP-кодеры. Управление данными кодерами осуществляется с помощью блока управления.

Блоки управления передающей стороны являются ведущими и по специально выделенному служебному каналу передают данные о параметрах кодека на приемную сторону. После CELP-кодеров сигналы передаются по каналу связи, в котором вносятся искажения. На приемной стороне искаженные сигналы поступают на входы CELP-декодеров, где происходит декодирование отсчетов сигнала и производной. Полученные декодированные сигналы поступают на блок, построенный на основе модификации алгоритма Хургина – Яковлева.

На выходе декодера получается восстановленный РС, который передается на приемник информации и на блок оценки качества. С выхода блока оценки качества восстановленного сигнала данные по каналу служебной информации поступают в блок управления кодека на передающей стороне, где оценивается степень искажения в канале связи и происходит перестройка параметров кодека.

### Описание эксперимента

Объектом исследования в данной работе является адаптивный к мешающим факторам кодек, основанный на кодеке CELP на основе модификации алгоритма Хургина – Яковлева. Реализация кодека и эксперименты полностью осуществлялись в программной среде MATLAB. Экспериментальные исследования заключались в моделировании предложенной модификации кодека CELP на основе модификации алгоритма Хургина – Яковлева и кодека CELP на основе теоремы В.А. Котельникова, изучении качества восстановленной речи при изменении отдельных параметров кодека, а также при действии шумов в канале связи, а также осуществляемом сравнении данных систем. Структурная схема этой системы представлена на рисунке 1.

В качестве критерия эффективности использовалась оценка качества речи на выходе системы, которая производилась при действии искажений в канале связи. Для оценки качества РС при проведении экспериментальных исследований использовалась шкала MOS-LQO и алгоритм оценки качества речи PESQ [8].

Задачей является определение параметров алгоритмов первичного кодирования, обеспечивающих наилучшее качество восстановленной речи на основе теоремы В.А. Котельникова и модификации алгоритма Хургина – Яковлева при действии различных помех и искажений в канале связи [9].

Для оценки качества речи и узнаваемости голоса диктора использовались акустические взвешенные фразы, которые приведены в ГОСТ Р 50840-95. Входными данными для систем является записанный РС с частотой дискретизации 8 кГц. Согласно [10] запись сигналов осуществлялась группой из 10 человек (5 мужчин и 5 женщин).

Для оценки помехоустойчивости использовались отсчеты аддитивного белого гауссовского шума (АБГШ), воздействующие на кодовую последовательность на выходе первичных кодеков прореженных отсчетов сигнала и прореженной производной с ОСШ от 40 до 0 дБ. Так как в данной работе рассматривается алгоритм CELP со скоростью 16 кбит/с, то в данном случае параметры кодера имеют следующие значения [11, 12]: коэффициент линейного предсказания  $a_i = 12$ , индекс кодовой книги  $k = 10$ , коэффициент усиления  $g = 13$ , коэффициент фильтра основного тона  $b = 13$ , задержка фильтра основного тона  $T = 8$ .

Расчет скорости передачи РС можно осуществить по формуле:

$$C = (M * a_i + L * (g + b + T + k)) / N. \quad (1)$$

### Экспериментальные исследования

Проведены экспериментальные исследования влияния параметров кодека CELP на основе теоремы В.А. Котельникова и модификации алгоритма Хургина – Яковлева на качество восстановленной речи при действии шумов в канале связи.

В данной работе проводились исследования влияния трех параметров кодека на качество восстановленной речи. Исследования проводились при заданных в рамках стандарта G.728 параметрах алгоритма  $M = 12$ ,  $N = 160$ ,  $L = 16$ . При изменении одного из параметров остальные два параметра фиксировались по данным значениям.

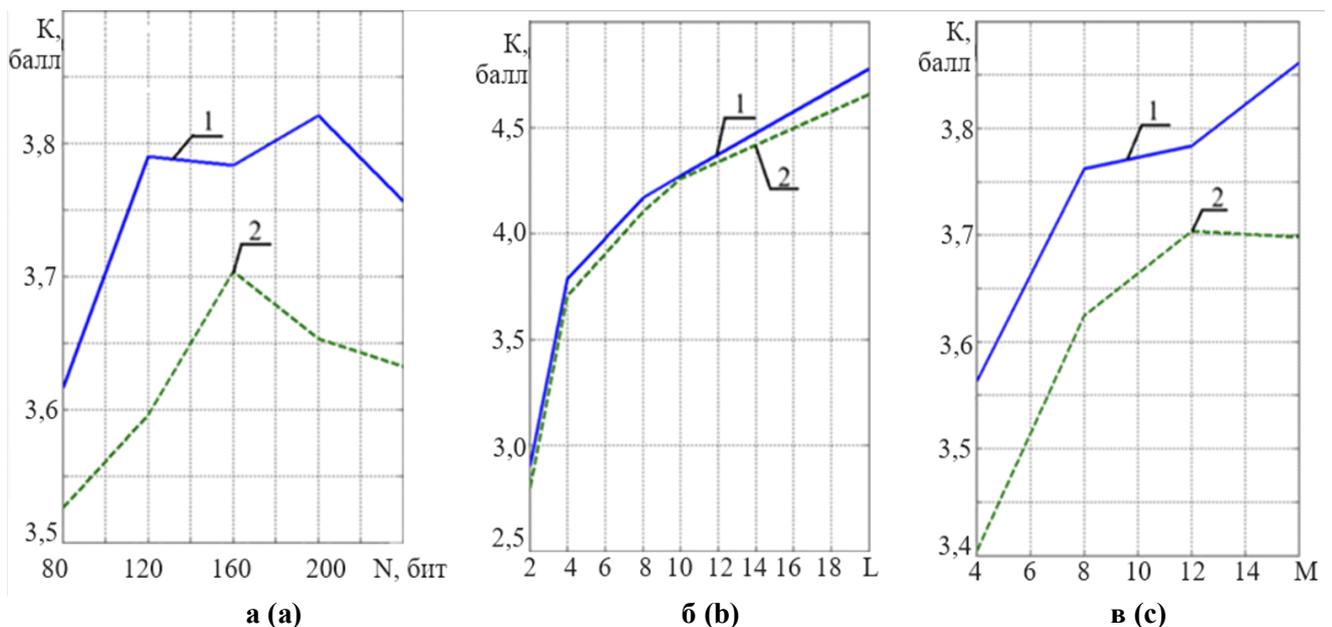
1. Длина кадра –  $N$ . Исследования проводились для следующих значений  $N$ : 80, 120, 160, 200, 240.

2. Количество подкадров –  $L$ . Исследования проводились для следующих значений  $L$ : 2, 4, 8, 10, 20.

3. Порядок линейного предсказателя –  $M$ . Исследования проводились для следующих значений  $M$ : 4, 8, 12, 16.

Данные параметры обусловлены значениями итоговой скорости передачи, которая не должна превышать значения 16 кбит/с, определенного стандартом ITU-T G.728.

На рисунке 2 представлены зависимости оценки качества восстановленной речи, полученной согласно шкале MOS-LQO (серия рекомендаций ITU-T P.800.1), от значений параметров кодека: длины кадра  $N$  (а), количества подкадров  $L$  (б), порядка предсказателя  $M$  (в), где кривая 1 – система на основе модификации алгоритма Хургина – Яковлева, кривая 2 – система на основе теоремы В.А. Котельникова.



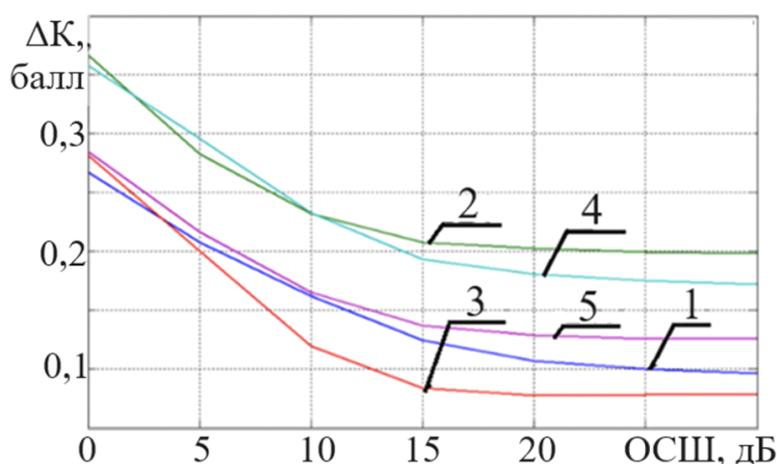
**Рисунок 2 – Зависимости оценки качества речи от параметров кодека**  
**Figure 2 – Dependence of speech quality evaluation on codec parameters**

Из представленных на рисунке 2, а графиках зависимостей видно, что при увеличении длины кадра увеличивается качество восстанавливаемой речи до некоего оптимального значения, затем начинается спад. Это увеличение обусловлено тем, что при увеличении длины кадра увеличивается количество избыточной информации, что снижает восприимчивость сигнала к искажениям, а также повышает эффективность долгосрочного предсказателя. Однако при превышении определенного порога качество начинает снижаться, что обусловлено тем, что количество подкадров фиксировано, и при увеличении длины кадра увеличивалась длина подкадров. Это приводит к снижению эффективности краткосрочного предсказателя и к ухудшению качества, так как начинают искажаться форманты, которые в значительной степени влияют на узнаваемость речи.

Из графиков на рисунке 2, б видно, что при увеличении количества подкадров увеличивается качество восстанавливаемой речи. Это обусловлено тем, что увеличение количества подкадров при фиксированной длине кадра приводит к уменьшению длины подкадров, а это в свою очередь повышает эффективность краткосрочного предсказателя, то есть восстановленные форманты речи имеют большую схожесть с исходным сигналом. Также видно, что модификация алгоритма Хургина – Яковлева обеспечивает более высокое качество восстановленной речи.

Из графиков, показанных на рисунке 2, в, видно, что при увеличении порядка предсказателя увеличивается качество восстановленной речи. Это обусловлено тем, что при увеличении порядка предсказателя анализируется большее число кадров и формируется большее число коэффициентов предсказания, что позволяет лучше восстанавливать РС. В системе на основе теоремы В.А. Котельникова при порядке предсказателя выше 12 наблюдается небольшое снижение качества восстановленной речи, что обусловлено тем, что повышение порядка предсказателя увеличивает накапливаемую ошибку фильтров краткосрочного и долгосрочного предсказания, что в свою очередь ведет к появлению искажений. Отсутствие снижения качества восстановленной речи в системе на основе модификации алгоритма Хургина – Яковлева обусловлено тем, что данный алгоритм повышает помехоустойчивость сигнала, что в свою очередь снижает влияние накопления ошибок фильтров и тем самым повышает качество восстановленного РС.

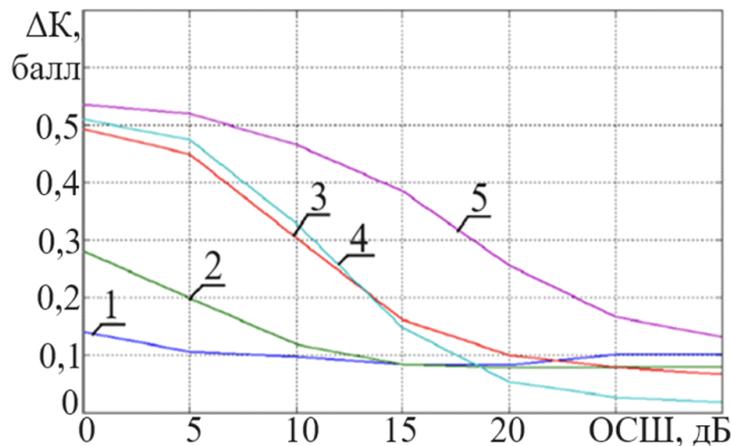
На рисунке 3 представлены графики зависимостей выигрыша качества восстановленной речи от ОСШ для систем на основе модификации алгоритма Хургина – Яковлева относительно аналогичной системы на основе теоремы В.А. Котельникова при различных значениях длины кадра  $N$ , где кривая 1 –  $N = 80$ , кривая 2 –  $N = 120$ , кривая 3 –  $N = 160$ , кривая 4 –  $N = 200$ , кривая 5 –  $N = 240$ .



**Рисунок 3 – Зависимости выигрыша качества восстановленной речи от ОСШ при различных значениях длины кадра**  
**Figure 3 – Dependence of the gain in the restored speech quality from SNR at different values of frame length**

Из графиков на рисунке 3 видно, что система на основе модификации алгоритма Хургина – Яковлева обеспечивает больший выигрыш в качестве восстановленной речи в области малых значений ОСШ, чем система на основе теоремы В.А. Котельникова. Ошибки, накопленные рекурсивными фильтрами долгосрочного и краткосрочного предсказания, оказывают меньшее влияние на качество восстановленного сигнала при использовании модификации алгоритма Хургина – Яковлева.

На рисунке 4 представлены зависимости выигрыша качества восстановленной речи от ОСШ при различном количестве подкадров  $L$ , где кривая 1 –  $L = 2$ , кривая 2 –  $L = 4$ , кривая 3 –  $L = 8$ , кривая 4 –  $L = 10$ , кривая 5 –  $L = 20$ .



**Рисунок 4 – Зависимости выигрыша качества восстановленной речи от ОСШ при различном количестве подкадров**  
**Figure 4 – Dependence of the gain in restored speech quality from SNR with different number of subframes**

Из графиков зависимостей, представленных на рисунке 4, видно, что использование системы на основе модификации алгоритма Хургина – Яковлева обеспечивает больший выигрыш в области малых значений ОСШ. Это объясняется тем, что параллельная обработка сигнала и его производной повышает помехоустойчивость сигнала, а также использование модификации алгоритма Хургина – Яковлева позволяет снизить искажения, вызванные накоплением ошибок фильтра краткосрочного предсказания.

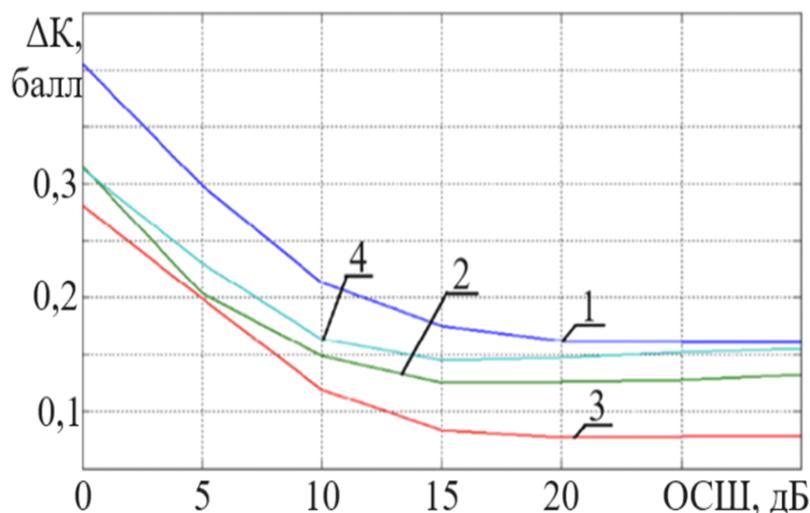
Большое количество подкадров обеспечивает лучшее качество передаваемой речи при большом ОСШ, а малое количество подкадров обладает большей устойчивостью к искажениям. Это объясняется рекурсивностью фильтра краткосрочного предсказания. Данный фильтр имеет свойство накапливать ошибки, что и вызывает искажения восстанавливаемого сигнала.

При использовании модификации алгоритма Хургина – Яковлева искажения, вызванные накоплением ошибок краткосрочного предсказателя, частично исправляются, что позволяет повысить качество речи на приеме.

На рисунке 5 представлены графики зависимости разности оценки качества восстановленной речи от ОСШ при различных значениях порядка предсказателя  $M$ , где кривая 1 –  $M = 4$ , кривая 2 –  $M = 8$ , кривая 3 –  $M = 12$ , кривая 4 –  $M = 16$ .

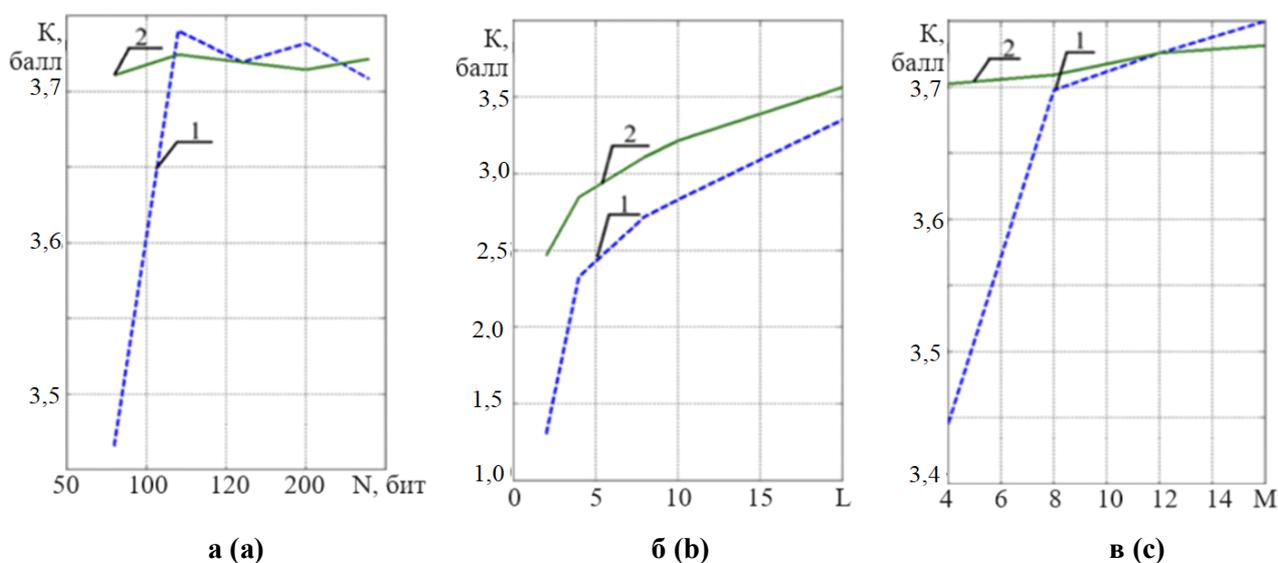
Из приведенных зависимостей на рисунке 5 видно, что использование системы на основе модификации алгоритма Хургина – Яковлева обеспечивает больший выигрыш качества восстановленной речи в области малых значений ОСШ. Это объясняется тем, что параллельная обработка сигнала и производной повышает помехоустойчивость сигнала с помощью исправления ошибок, возникающих в фильтрах краткосрочного и долгосрочного предсказания. Повышение порядка предсказателя увеличивает накапливаемую ошибку фильтров краткосрочного и долгосрочного предсказания, что в свою очередь ведет к появлению искажений. Использование алгоритма Хургина – Яковлева позволяет снизить влияние накопления ошибок фильтров и тем самым повышает качество восстановленного сигнала.

Проведены экспериментальные исследования влияния параметров отдельных кодеков CELP прореженных отсчетов сигнала и его первой производной на качество восстановленной речи на выходе системы передачи на основе предложенной модификации алгоритма Хургина – Яковлева. Исследования проведены при изменении одного из параметров кодека сигнала или производной соответственно. Значения других параметров также фиксировались на стандартных значениях  $M = 12$ ,  $N = 160$ ,  $L = 16$ .



**Рисунок 5 – Зависимости выигрыша качества восстановленной речи от ОСШ при различных значениях порядка предсказателя**  
**Figure 5 – Dependence of the gain in restored speech quality from SNR for different values of predictor order**

На рисунке 6 представлены зависимости качества восстановленной речи от параметров кодека: длины кадра (а), количества подкадров (б), порядка предсказателя (в), где кривая 1 – параметры кодера сигнала, кривая 2 – параметры кодера производной.



**Рисунок 6 – Зависимости качества речи от параметров кодека**  
**Figure 6 – Dependence of speech quality evaluation on codec parameters**

Из графиков на рисунке 6 видно, что изменение параметров кодера производной незначительно влияет на качество восстановленной речи, поэтому возможно определить передаваемые параметры кодека CELP, которые обеспечат минимальную скорость при максимально возможном качестве восстановленной речи. Поэтому с целью сокращения избыточности передаваемой информации целесообразно уменьшить порядок предсказателя производной, увеличив длину кадра для кодера производной.

В ходе экспериментальных исследований получены зависимости качества речи от параметров кодека. В результате анализа полученных зависимостей найдены параметры, обеспечивающие хорошее качество передаваемого сигнала и низкую скорость сигнала на выходе. В таблице 1 представлены полученные параметры разработанного кодека на основе кодека CELP и модификации алгоритма Хургина – Яковлева.

**Таблица 1 – Параметры разработанного кодека**  
**Table 1 – Parameters of the codec developed**

Параметр	Численное значение
Длина кадра сигнала	200
Количество подкадров сигнала	20
Порядок предсказателя сигнала	8
Длина кадра производной	240
Количество подкадров производной	20
Порядок предсказателя производной	4

Таким образом, предложенные параметры в таблице 1 обеспечивают скорость передачи отсчетов сигнала согласно формуле (1) на уровне 4,88 кбит/с, а скорость передачи отсчетов производной 3,87 кбит/с. Полная скорость передачи разработанного кодека CELP на основе модификации алгоритма Хургина – Яковлева составляет 8,75 кбит/с.

### Заключение

Предложена модификация кодека CELP на основе стандарта G.728, адаптивная к воздействию искажений в канале связи, на основе модификации алгоритма Хургина – Яковлева. В результате экспериментальных исследований проанализировано влияние параметров кодеков сигнала и его первой производной на качество восстановленной речи на выходе системы передачи. Показано, что отсчеты производной имеют меньшее влияние на качество восстановленной речи, что позволяет снизить скорость передачи в первичном кодеке.

Показано, что применение модификации алгоритма Хургина – Яковлева позволяет повысить помехоустойчивость передаваемой информации при действии коррелированных отсчетов АБГШ на кодовую последовательность на выходе первичных кодеков прореженных отсчетов сигнала и прореженной производной. Выигрыш качества восстановленной речи при этом составляет от 0,1 до 0,5 баллов согласно шкале MOS-LQO.

В результате анализа экспериментальных исследований обоснованы значения параметров кодека сигнала и его первой производной, обеспечивающие снижение скорости передачи с 16 кбит/с (стандарт G.728) до 8,75 кбит/с при качестве восстановленной речи на уровне 3,6 – 3,7 балла. Показано, что предложенная модификация кодека CELP обеспечивает качество восстановленной речи при ОСШ более 20 дБ на уровне выше 3,5 баллов согласно шкале MOS-LQO, что является достаточным для применения в современных системах связи.

### Библиографический список

1. Кириллов С.Н., Дмитриев В.Т. Реализационные возможности и помехоустойчивость процедуры восстановления сигналов на основе алгоритма Хургина – Яковлева // Радиотехника. 2003. № 1. С. 73-75.
2. Дмитриев В.Т., Харланова Е.А. Алгоритм кодирования речевых сигналов на основе представления Хургина – Яковлева и вейвлет-пакетного разложения в системах компьютерной телефонии // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2010. № 31. С. 98-101.
3. Дмитриев В.Т. Помехоустойчивость кодеков речи на основе алгоритма Хургина – Яковлева // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2003. № 12 С.133-136.
4. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. М.: Из-во иностранной литературы, 1963. 832 с.
5. Хургин Я.И., Яковлев В.П. Фinitные функции в физике и технике. М.: Наука, 1971. 408 с.
6. Дмитриев В.Т. Адаптация кодека CELP к воздействию акустических помех. // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2021. № 76. С. 25-34.
7. Дмитриев В.Т. Исследование и разработка алгоритмов обработки речевой информации на основе представления Хургина – Яковлева в радиотехнических устройствах: дис. канд. техн. наук: 05.12.04. Рязань, 2006. 230 с. РГБ ОД, 61:06-5/1566.

8. **Дмитриев В.Т., Бахурин С.А.** Исследование точности алгоритмов оценки отсчетов производной в радиотехнических устройствах // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2004. № 13. 2004. С.32-35.

9. **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.

10. ГОСТ Р 50840-95. Государственный стандарт Российской Федерации «Передача речи по трактам связи. Методы оценки качества, разборчивости и узнаваемости».

11. **Mark D. Grosen.** Implementation of a CELP Speech Coder for the TMS320C30 using SPOX. Texas Instruments. 1997. 22 с.

12. Recommendation ITU-T G.728: Coding of speech at 16 kbit/s using low-delay code excited linear prediction.

UDK 621.395

## ADAPTIVE CODING ALGORITHM BASED ON CELP CODEC AND MODIFICATION OF THE KHURGIN – YAKOVLEV ALGORITHM

**V. T. Dmitriev**, Doctor in Technical Sciences, department of radio control and communication, Head of the department, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0000-0001-5521-6886, e-mail: vol77@rambler.ru

**S. Yu. Lantratov**, student RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0009-0004-7428-5296, e-mail: sergeylantratov2000lsu@gmail.com

*An algorithm for encoding speech signals based on CELP codec and modification of the Khurgin – Yakovlev algorithm adaptive to distortions in a communication channel has been developed and studied. **The aim of the work** is to develop and study an algorithm for adapting CELP codec to the effects of distortion in a communication channel. In this work, this aim is achieved by selecting separate sets of CELP codec parameters, which when exposed to distortion in a communication channel provide higher quality of speech signals at codec output. The study of the influence of the parameters on speech quality at the output of CELP codec based on V.A. Kotelnikov theorem and Khurgin – Yakovlev representations has been conducted.*

**Keywords:** *speech signal, noise immunity, adaptive codec, primary encoding, speech signals transmission, speech signals codecs, Khurgin – Yakovlev representation, speech quality, CELP codec.*

**DOI:** 10.21667/1995-4565-2024-88-21-30

### References

1. **Kirillov S.N., Dmitriev V.T.** Realizacionnye vozmozhnosti i pomekhoustojchivost' procedury vostanovleniya signalov na osnove algoritma Hurgina – Yakovleva. *Radiotekhnika*. 2003, no. 1, pp. 73-75. (in Russian).

2. **Dmitriev V.T., Harlanova E.A.** Algoritm kodirovaniya rechevyh signalov na osnove predstavleniya Hurgina – Yakovleva i vevjlet-paketnogo razlozheniya v sistemah komp'yuternoj telefonii. *Vestnik Ryzanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2010, no. 31, pp. 98-101. (in Russian).

3. **Dmitriev V.T.** Pomekhoustojchivost' kodekov rechi na osnove algoritma Hurgina –Yakovleva. *Vestnik Ryzanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2003, no.12, pp.133-136. (in Russian).

4. **Shannon K.** *Raboty po teorii informacii i kibernetike*. Moscow: Izdatel'stvo inostrannoju literatury. 1963. 832 p. (in Russian).

5. **Hurgin Ya.I., Yakovlev V.P.** *Finitnye funkcii v fizike i tekhnike*. Moscow: Nauka. 1971. 408 p. (in Russian).

6. **Dmitriev V.T.** Adaptaciya kodeka CELP k vozdejstviyu akusticheskikh pomekh. *Vestnik Ryzanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2021, no. 76, pp. 25-34. (in Russian).

7. **Dmitriev V.T.** *Issledovanie i razrabotka algoritmov obrabotki rechevoj informacii na osnove predstavleniya Hurgina – Yakovleva v radiotekhnicheskikh ustrojstvah*: dis. kand. tekhn. nauk: 05.12.04. Ryazan', 2006. 230 p. RGB OD, 61:06-5/1566. (in Russian).

8. **Dmitriev V.T., Bahurin S.A.** *Issledovanie tochnosti algoritmov ocenki otschetov proizvodnoj v radiotekhnicheskikh ustrojstvah*. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2004, no. 13, pp. 32-35. (in Russian).

9. **Dmitriev V.T.** *Adaptaciya kodekov rechevyh signalov na osnove teoremy V.A. Kotel'nikova i modifikacii algoritma Hurgina – Yakovleva k shumam v kanale svyazi*. *Cifrovaya obrabotka signalov*. 2023, no. 2, pp. 55-60. (in Russian).

10. GOST R 50840-95. Gosudarstvennyj standart Rossijskoj Federacii «*Peredacha rechi po traktam svyazi. Metody ocenki kachestva, razborchivosti i uznavaemosti*». (in Russian).

11. **Mark D. Grosen.** *Implementation of a CELP Speech Coder for the TMS320C30 using SPOX*. Texas Instruments. 1997. 22p.

12. Recommendation ITU-T G.728: *Coding of speech at 16 kbit/s using low-delay code excited linear prediction*.