

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
МОСКОВСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ СВЯЗИ И ИНФОРМАТИКИ

На правах рукописи

УДК 621 395 644

ЕЛБХАИСИ МАХМУД

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНОГО МЕТОДА  
ОЦЕНКИ И СПОСОБА ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПЕРЕДАЧИ  
РЕЧЕВОЙ ИНФОРМАЦИИ ПО СЕТИ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ  
ПАЛЕСТИНСКОГО РЕГИОНА**

Специальность 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

Кандидат технических наук

проф. Попов О.Б.

Москва - 2013 г.

## Оглавление

Введение.....	5
Глава 1. Основные категории качества СПРС (системы передачи речевых сигналов) Палестины, особенность структуры сети, языковые особенности .....	10
1.1. Типовой многозвенный канал и его структурная схема в Палестинском регионе .....	10
1.2. Особенности оценки качества передачи речевой информации по каналам мобильной связи.....	14
1.3. Структура сигналов речевой информации .....	17
1.4. Классификация помех, присутствующих в каналах мобильной связи .....	23
1.5. Качество услуг телефонной сети мобильной связи .....	25
1.5.1. Концепция качества услуг .....	25
1.5.2. Концепция характеристик сети. ....	27
1.5.3. Перечень показателей качества услуг подвижной связи.....	29
1.6. Методы проведения испытаний качества услуг. ....	31
1.6.1. Опрос клиентов .....	32
1.6.2. Анализ статистических данных.....	40
1.6.3. Анализ обращений клиентов .....	50
1.6.4. Контрольно-измерительная аппаратура .....	51
1.7. Разработка математических основ современных методов оценки качества передачи речевой информации по каналам мобильной связи. ....	54
1.7.1. Особенности контроля качества передачи речи.....	54
1.7.2. Субъективные методы контроля качества передачи .....	58
1.8. Численная оценка качества передачи информации по мобильным каналам связи при объективных методах контроля .....	72
1.9. Оценка качества передачи по критерию громкости.....	79
1.10. Оценка качества передачи по критерию разборчивости .....	81
1.11. Оценка качества передачи по критерию натуральности .....	84

Выводы.....	89
Глава 2. Разработка алгоритма работы устройства контроля качества передачи речи по каналам МТС и создание имитационной модели.....	92
2.1. Критерий эффективности объективной оценки качества передачи речи при различных методах контроля .....	92
2.2. Выбор места подключения устройства контроля качества передачи речевой информации по каналам мобильной связи.....	94
2.4. Функциональная схема устройства контроля качества передачи речи при мобильной связи .....	97
2.5. Алгоритм работы устройства объективной оценки качества передачи речевой информации.....	98
2.6. Имитационная модель эксперимента, определяющего работоспособность устройства объективной оценки качества передачи речевой информации по каналу мобильной связи .....	102
2.7. Эксперимент исследования объективного метода оценки качества передачи речевых сигналов по каналам мобильной связи на базе имитационной модели .....	108
2.7.1. План проведения эксперимента исследования объективного метода оценки качества передачи речевой информации по каналам мобильной связи.....	109
2.7.2. Разработка математической основы имитационной модели.....	110
2.8. Программная реализация метода объективной оценки качества передачи РС .....	120
Выводы:.....	124
Глава 3. Разработка алгоритмов объективной оценки качества передачи речевого сигнала и создание устройства контроля качества и его имитационной модели .....	125
3.1. Критерии эффективности объективной оценки качества передачи речи при различных методах контроля .....	125
3.2. Алгоритм формирования оценки ОСМ .....	126
3.3. Исследование искажений при многократном кодировании РС .....	127
3.4. Изменения энергетических характеристик речевого сигнала до и после обработки его кодеками с различной степенью сжатия .....	134
3.5. Характер изменения значений ОСМс и дОСМс.....	153

3.6.Характер изменения значений ОСМк и дОСМк .....	153
Выводы:.....	156
Глава 4. Исследование ухудшение качества речевого сигнала в составных каналах СПРС, разработка алгоритма компенсации искажения .....	157
4.1. Исследование зависимости параметров РС от скорости передачи .....	157
4.2.Разработка алгоритмов коррекции речевого сигнала .....	165
4.3. Описание структурной схемы алгоритма.....	175
Выводы.....	180
Глава 5. Результаты исследования эффективности алгоритма обработки РС .....	181
5.1 Исследование искажений РС в канале СПРС с многократным преобразованием .....	181
5.2. Компенсация мскажений РС с использованием ПВК.....	187
Выводы.....	202
Заключение .....	203
Список литературы .....	205
Приложение 1. ....	211
Приложение 2 .....	268

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы.** Исследование и разработка современного эффективного метода оценки качества передачи речевой информации по каналам мобильной связи (КМС) Палестинского региона, посвящены вопросам контроля качества передачи речевых сигналов (РС).

Каналы мобильной связи, как правило, имеют различную структуру и, следовательно, переменное значение времени распространения информационного сообщения. В этом случае, из-за воздействия помех различного вида (электрическое эхо, гладкий шум, внятный переходной разговор и т.д.), качество передачи речевой информации может значительно изменяться от соединения к соединению.

Для поддержания требуемого качества необходимо, прежде всего, уметь оценить его и, в случае необходимости, применяя специальные корректирующие устройства (например; эхоподавители, компандеры и т.д.), довести до требуемого нормативного значения.

Оценивать качество передачи основного вида информации - РС следует современными объективными методами, чтобы исключить субъективный человеческий фактор. В данной работе предпринята попытка комплексного подхода к совершенствованию уже существующих методов, и созданию современного перспективного метода контроля качества без перерыва связи. Такой метод должен обеспечить следующие показатели: высокую точность оценки, высокую эффективность, использование нанотехнологии при технической реализации.

**Цель и основные задачи работы.** Целью диссертационной работы является:

- создание усовершенствованного объективного метода оценки качества передачи РС по КМС и рассмотрение возможности его технической реализации;

- разработка дополнительных рекомендаций по возможности изменения необходимых параметров абонентского аппарата (мобильника) в случае отклонения реальных показателей качества от нормативных значений.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие задачи исследования:

- проведён анализ существующих методов оценки качества передачи РС по КМС;
- исследованы спектральные и вероятностные характеристики РС;
- разработаны численные и интегральные методы оценки качества передачи РС;
- разработаны основные составляющие интегрального критерия объективного метода оценки;
- разработан метод определения основных составляющих интегрального коэффициента качества передачи РС;
- разработан математический аппарат для решения предлагаемого метода оценки качества, а также составлен на его основе обобщённый алгоритм технической реализации;
- разработаны математические основы и логические структуры алгоритма действия имитационной модели, реализующей предлагаемый метод оценки качества передачи РС по КМС;
- рассмотрены возможности практической реализации устройства объективной оценки качества передачи РС по КМС;
- разработаны рекомендации по воздействию на параметры абонентского аппарата мобильной связи.

**Объект исследования.** Объектом исследования является сеть мобильной связи Палестинского региона, использующая различные

технические решения по борьбе с мешающим воздействием электрического эха.

**Методы исследования.** В диссертационной работе использовались методы математической статистики, теории информации и теории случайных процессов. Все эксперименты выполнены с использованием современной вычислительной техники на базе программного обеспечения, созданного в научно-исследовательской лаборатории кафедры МТС с участием автора.

**Научная новизна** настоящей работы заключается в следующем:

- предложен современный метод объективной оценки качества передачи РС по КМС, который учитывает соотношение всех показателей качества (громкости, разборчивости, натуральности) и позволяет автоматически контролировать и адекватно оценивать качество передачи РС;

- составлен алгоритм работы и предложена функциональная схема устройства оценки качества передачи РС по КМС. Определено место его расположения;

- предварительно подготовлены рекомендации мер при необходимости воздействия на параметры абонентского аппарата мобильной связи по результатам определения реального интегрального коэффициента качества передачи РС по КМС.

**Практическая ценность** работы состоит в том, что предложенный метод объективной оценки качества передачи РС по КМС позволяет:

- получить достоверный результат измерения величины коэффициента качества;
- автоматизировать процесс контроля качества без прерывания связи;
- использовать разработанные модели при создании устройства

контроля (УК) качества передачи речевой информации по КМС и предоставить возможность предприятиям изготовителям модернизировать абонентский аппарат мобильной связи.

УК, реализованное на основе системы мониторинга микропроцессоров, уже применяемых в разработанных абонентских аппаратах мобильной связи (ААМС), либо во вновь создаваемых ААМС.

Результаты диссертационной работы в виде алгоритма, математических и имитационных моделей УК и его среды функционирования будут переданы для разработки опытного образца устройства контроля в какое-либо промышленное предприятие связи, а также внедрены в учебный процесс МТУСИ, что подтверждается соответствующими актами о внедрении.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты исследований докладывались и опубликованы в виде трудов и тезисов докладов конференций:

- Телекоммуникационные и вычислительные системы» в рамках Международного форума информатизации МФИ-2009 и МФИ-2010 (Москва);
- 10-ой международной научно-технической конференции «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» - ФРЭМЭ - 2010 (Владимир);
- 3-ей международной научно-практической конференции «Наука и современность – 2010» (Новосибирск);
- Международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения» INTERMATIC – 2010 (Москва);
- 5-ой отраслевой научно-технической конференции «Технологии информационного общества» (Москва) и др.

Результаты диссертации также опубликованы в журналах «Т-Comm - Телекоммуникации и транспорт », «Естественные и технические науки» и «Объединенный научный журнал».



**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 10 работ, в том числе 2 статьи и 5 тезисов докладов на НТК различного уровня.

**Основные положения, выносимые на защиту.**

1. Использование результатов проведенных исследований обеспечит необходимый контроль качества передачи речевой информации при мобильных соединениях от различных видов помех.

2. Функциональная схема устройства контроля создана без использования особо сложных по структуре звеньев.

3. Тенденция к расхождению алгоритмов контроля в паузах речи при воздействии шума, в большой степени проявляющихся для арабской речи по сравнению с русской, требует дополнительной остановки перестройки алгоритма контроля.

4. Введение остановки в работе УК требует применения дополнительных мер по совершенствованию функциональной схемы УК, т. е. использования вновь разработанных звеньев.

**Структура и объём работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложения. Работа содержит 277 страницу, в том числе 211 страниц основного текста, 193 рисунка, 47 таблиц. Библиография включает 58 наименования. Приложения размещены на 67 страницах.

# **ГЛАВА 1. ОСНОВНЫЕ КАТЕГОРИИ КАЧЕСТВА СПРС (СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ РЕЧЕВЫХ СИГНАЛОВ) ПАЛЕСТИНЫ, ОСОБЕННОСТЬ СТРУКТУРЫ СЕТИ, ЯЗЫКОВЫЕ ОСОБЕННОСТИ**

## **1.1. Типовой многозвенный канал и его структурная схема в Палестинском регионе**

Физическое соединение между передатчиком и приемником образуется путем последовательного соединения нескольких каналов связи в единый составной канал связи. Такая ситуация возникает при передаче информации на значительные расстояния с использованием существующей телефонной сети. В этом случае с помощью нескольких каналов связи и автоматических телефонных станций образуется составной канал. В зависимости от режима использования составного канала связи различают некомутируемые (арендуемые) и коммутируемые каналы. Некоммутируемым называется составной канал, который создается и существует на протяжении определенного интервала времени не зависимо от передачи информации. В отличие от арендуемого канала коммутируемый канал создается только на время передачи каждого из сообщений, а в остальное время отдельные, составляющие его каналы связи, могут быть использованы для других целей. За счет этого стоимость передачи информации по коммутируемым каналам ниже, однако, они характеризуются следующими недостатками: вероятность появления ошибок при передаче данных по коммутируемым каналам на один - два порядка выше, чем при передаче данных по арендуемым каналам. Составной канал может состоять из различных вариаций сегментов используемых линий передачи, где различают проводные линии, радиолинии, волоконно-оптические, спутниковые линии.

Параметры реальной абонентской линии, проложенной в условиях городской телефонной канализации, отличаются от параметров телефонного кабеля. Большую роль при этом играют условия, в которых проложен кабель (трубопроводы или тоннели, или грунт, или подводный кабель). Большие изменения вносит качество соединений кусков кабелей, соединительные муфты, способ и качество коммутации в распределительных коробках и шкафах. Физические дефекты кабеля могут привести (и приводят) к местному изменению его электрических характеристик, что существенно ухудшает работу широкополосных систем передачи. Каждая кабельная муфта может быть подвержена коррозии, проникновению воды и изменению своего сопротивления (с полным или частичным обрывом соединения). Частично эти показатели тоже нормированы (например, величина затухания при сращивании кабелей).

Стоит так же указать на возможные пути замены проводных абонентских линий. Первый из них — это радио доступ. При таком способе рядом с местом концентрации абонентов (жилым домом или пригородным массивом) возводится базовая радиостанция для связи с абонентами, а с другой стороны подключенная к стационарной проводной сети. У абонентского аппарата устанавливается радио приставка, которая позволяет вести переговоры и в большинстве случаев пользоваться Internet-связью. При этом возможно множество решений, очень близких к решениям применяемых при подвижной связи. В качестве протокола можно использовать DECT.

Применение радиодоступа позволяет создавать эффективную сеть в пригородных зонах. Недостатком является зависимость этой сети от прямой видимости и чувствительность к помехам. Возможные структуры составных каналов на сети мобильной связи приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1. Возможные структуры составных каналов на сети мобильной связи.

БС – ЦК СПС – БС
БС – ЦК СПС – ТЦК СПС – ЦК СПС – БС
БС – ЦК СПС – ЛЦК – ТЦК – ЦК СПС – БС
БС – ЦК СПС – транзитная сеть – ЦК СПС – БС
БС – ЦК СПС – ЦК СПС – БС
БС – ЦК СПС – транзитная сеть – МЦК (МНТС) (АО)
БС – ЦК СПС – МЦК (МНТС) (АО)

В приведённой таблице обозначены следующие сокращения:

**БС** - блок сообщения (мобильный телефонный аппарат или обычный телефонный аппарат);

**ЦК СПС** - центр коммутации систем передачи сообщений;

**ТЦК СПС** - территориальный центр коммутации систем передачи сообщений;

**ЛЦК** - линейный центр коммутации;

**ТЦК** - территориальный центр коммутации;

**МЦК (МНТС) (АО)** - местный центр коммутации (местная национальная телефонная сеть или автономная область).

Типы каналов, по которым передаются сигналы, многочисленны и разнообразны. Различают каналы проводной связи (воздушные, кабельные, световодные и др.) и каналы радиосвязи. Кабельные линии связи являются основой магистральных сетей дальней связи, по ним осуществляется передача сигналов в диапазоне частот от десятков кГц до сотен МГц. Перспективны волоконно-оптические линии связи. Они позволяют в диапазоне 600 -900 ТГц (0,5...0,3 мкм) обеспечить очень большую пропускную способность (сотни ТВ или сотни тысяч ТФ каналов). Наряду с проводными линиями связи используются радиолнии различных

диапазонов (от сотен кГц до десятков ГГц). Эти линии незаменимы для связи с подвижными объектами. Наибольшее распространение для многоканальной радиосвязи получили радиорелейные линии (РРЛ) метрового, дециметрового и сантиметрового диапазонов на частотах от 60 МГц до 15 ГГц. Разновидностью РРЛ являются тропосферные линии с использованием отражений от неоднородностей тропосферы. Всё большее применение находят спутниковые линии связи - РРЛ с ретранслятором на ИСЗ. Для этих линий (систем) связи отведены диапазоны частот 4...6 и 11...27,5 ГГц. Большая дальность при одном ретрансляторе на спутнике, гибкость и возможность организации глобальной связи - важные преимущества спутниковых систем.

Классификацию каналов ведут по различным показателям:

- назначению (телеграфные, телефонные, телевизионные и т.д.);
- виду физической среды распространения (проводные, волноводные, радио и др.);
- диапазону используемых частот;
- способу распространения электромагнитных колебаний (с открытым или закрытым распространением);
- характеру информационных параметров сигналов на входе и выходе канала (непрерывные, дискретные, дискретно- непрерывные и т.д.).

В каналах с закрытым распространением электромагнитная волна распространяется по направляющим линиям: кабельным, волноводным, оптоволоконным.

В каналах с открытым распространением электромагнитная волна распространяется в космическом, околоземном или водном пространстве. Если входные и выходные сигналы канала являются непрерывными (по уровню), то канал называется непрерывным. Если сигналы являются дискретными (по уровням), то и канал называется дискретным. Встречаются дискретно-непрерывные и непрерывно-дискретные каналы, на вход которых поступают дискретные сигналы, а с выхода снимаются непрерывные, или

наоборот. Видно, что канал может быть дискретным или непрерывным независимо от характера передаваемых сообщений. Более того, в одной и той же системе связи можно выделить как дискретный, так и непрерывный канал. Всё зависит от того, каким образом выбраны точки А и Б входа и выхода канала.

## **1.2. Особенности оценки качества передачи речевой информации по каналам мобильной связи**

При оценке качества передачи речевой информации по проводным или составным каналам связи применяются ранее разработанные методы российских и зарубежных учёных. Как правило, это либо субъективные, либо квазисубъективные, либо объективные методы. В последнее время наиболее часто используются объективные методы оценки, дающие возможность автоматизировать данный процесс, сделать его экономичнее и технологичнее, и, что самое важное, осуществлять оценку качества без перерыва связи. Все эти методы практически реализованы на современной элементной базе.

Однако применить все имеющиеся методы оценки качества при передаче речевой информации по каналам мобильной связи становится практически невозможным. Этому есть ряд объяснений, на которые следует обратить особое внимание:

- при мобильной связи оценку качества проводят непосредственно абоненты, ведущие в данный момент переговоров;
- абоненты могут вести разговор в разных ситуационных условиях: в стационарных в движении, либо один из них: в стационаре, а другой в движении;
- каналы мобильной связи, даже для одного и того же соединения, могут иметь разную структуру (разное время прохождения информационного сообщения);
- от структуры канала мобильной связи зависит величина помех,

влияющих на качество, и их разновидность;

- в свою очередь структура канала, непосредственно связана со структурой сети мобильной связи, определяемой системой, предоставляющей услуги связи (МТС, GSM и т. д.).

Остановимся подробнее на каждом из перечисленных факторах, определяющих сложность применения имеющихся в наличии методов оценки. Это даст возможность выделить основные компоненты каждого из факторов и учесть их при разработке нового совершенного метода оценки качества передачи информации по мобильным каналам связи.

Первый фактор свидетельствует о том, что оценка качества передачи речевой информации, осуществляемая непосредственно абонентами, относится к оценке, определяемой субъективными методами. Известны достоинства и недостатки этих методов. К сожалению, для получения достоверных результатов измерений необходим достаточно большой объём испытаний, что связано со значительными экономическими затратами. При этом необходима подготовка специальных бригад операторов и аудиторов, требующая определённого немалого времени. Обычно такие измерения проводятся в стационарных условиях (специально оборудованных кабинах). Подобные стационарные условия естественно отсутствуют при оценке качества передачи информации по каналам мобильной связи. Как поступить в данном случае? Наверное, либо использовать специализированные бригады операторов и аудиторов в качестве абонентов, ведущих переговоры, используя заранее подготовленные тестовые тексты, либо использовать какие то дополнительные устройства контроля, прилагаемые к телефонным мобильным аппаратам. Правда, подобные устройства должны сочетаться с типом телефонного мобильного аппарата.

Второй фактор характеризует ситуационные условия ведения переговоров абонентами, которые могут быть самыми различными. Самый простой случай, когда абоненты общаются, находясь в

стационарных пунктах. Качество передачи речевой информации в этом случае зависит в основном от помехозащищённости, определяемой направляющей средой (структурой канала связи). Разновидность помех – предсказуема и, следовательно, снизить воздействие их на качественный показатель становится реальностью. Сложнее обстоит дело в двух других ситуациях. К существующей разновидности помех добавляются так называемые индустриальные помехи (помехи от работающих автомобильных двигателей, от движущихся в метро электропоездов, от линий передач электрической энергии, и т. д.). Снизить влияние такого рода помех – сложнее. Как известно, от величины помехозащищённости зависят важные составляющие обобщённого коэффициента качества – разборчивость и натуральность. Третья составляющая – громкость может зависеть от протяжённости соединения. Однако, при соблюдении требований к нормативным значениям параметров канала связи эта зависимость исключается.

Третий фактор, учитывающий возможность возникновения разной структуры канала связи при соединении одной и той же пары абонентов, может влиять на величину времени распространения сигнала. В отдельных случаях величина такого времени достигает такого значения, при котором начинает сказываться мешающее действие отражённых сигналов – токов электрического эха. Это обстоятельство приведёт к ещё большей вероятности снижения качества передачи речевой информации по каналам мобильной связи. Конечно, к данному моменту имеются и теоретические, и практические наработки по проблеме эхоподавления. Единственная проблема, которая остаётся открытой, это место включение эхоподавляющих устройств в канал связи. При мобильной связи эту проблему можно решить, если эхоподавителями оборудовать каждый телефонный аппарат, что современная элементная база вполне позволяет.



Четвёртый фактор хоть и носит самостоятельный характер, однако имеет косвенную связь со вторым фактором. Дело в том, что структура канала мобильной связи в немалой степени зависит от ситуации ведения переговоров. Таким образом, ранее проанализированная разновидность помех зависит не только от ситуации ведения переговоров, но и от структуры канала связи. Таким образом, нет необходимости повторяться о разновидности помех и их влияния на качество.

Пятый фактор фактически объединяет второй и четвёртый факторы. Однако, структура сети мобильной связи существенно влияет на структуру канала, особенно на его линейную часть, где сосредоточено наибольшее количество источников помех, влияющих на величину помехозащищённости, а следовательно и на качество.

### **1.3. Структура сигналов речевой информации**

Речевой сигнал имеет двойственную природу – с одной стороны, это обычный акустический сигнал, который представляет собой процесс распространения энергии акустических колебаний в упругой среде. Как любой акустический сигнал, он может быть представлен в виде звуковых волн, представляющих собой распространение процессов сжатия и разряжения частиц среды, формы фронтов которых зависят от свойств источника и условий распространения. Поэтому, как и другие акустические сигналы, речь характеризуется определенным набором объективных характеристик: зависимостью звукового давления от времени (временной структурой звуковой волны), длительностью звучания, спектральным составом, местом расположения источника в пространстве и пр.

С другой стороны, речь как физическое явление вызывает определенные субъективные слуховые ощущения (громкости, высоты, тембра, локализации, маскировки и др.).

Речевой сигнал подвергается такой же процедуре обработки в слуховой системе, как и любой другой акустический сигнал. Однако, если человек

воспринимает речь на языке, которому он был предварительно обучен, то наряду с обработкой чисто акустической информации (громкости, высоты, тембра и пр.) происходит фонетическая, а вслед за ней и семантическая расшифровка информации, для чего подключаются специальные отделы головного мозга.

Речь представляет собой колебания сложной формы, зависящей от произносимых слов, тембра голоса, интонации, пола и возраста говорящего [7]. Спектр речи весьма широк (примерно от 50 до 10000 Гц), но для передачи речи по каналам связи достаточно полосы в 3,1 кГц (0,3...3,4 кГц).

Ограничение полосы сигнала ухудшает восприятие ряда звуков (например, шипящих, существенная часть энергии которых сосредоточена в верхней части речевого спектра), но мало затрагивает разборчивость.

Символы, из которых составлен речевой сигнал, называются фонемами. В каждом языке имеется присущее ему множество фонем, обычно от 30 до 50 (в арабском языке большинство исследователей насчитывают 42 звука речи – 6 гласных и 36 согласных).

Звуки речи образуются в результате прохождения воздушного потока из легких через голосовые связки и полости рта и носа [8]. При разговоре грудная клетка сжимается и расширяется, поток воздуха проходит из легких через трахею и гортань в полости глотки, рта и носа. Голосовой тракт простирается от голосовой щели (отверстия между голосовыми складками в гортани) до губ. В процессе речеобразования его форма меняется.

Если произносятся звонкие звуки (гласные, носовые, звонкие согласные), голосовые складки в гортани смыкаются и размыкаются с той или иной частотой, частотой основного тона. Получается последовательность импульсов воздушного потока, которые возбуждают полости голосового тракта. Говоря, человек меняет геометрические размеры этих полостей, соответственно меняются и их резонансные частоты, форманты. Органы речи обладают инерционностью: на интервале 20 - 30 мс параметры речи можно считать постоянными.

Частота основного тона обычно находится в интервале от 50 до 400 Гц. На рис. 1.1 [8] приведены временная зависимость и спектр, соответствующие гласному звуку "и". Хорошо виден периодический характер сигнала; в спектре ярко выражены основной тон и форманты.

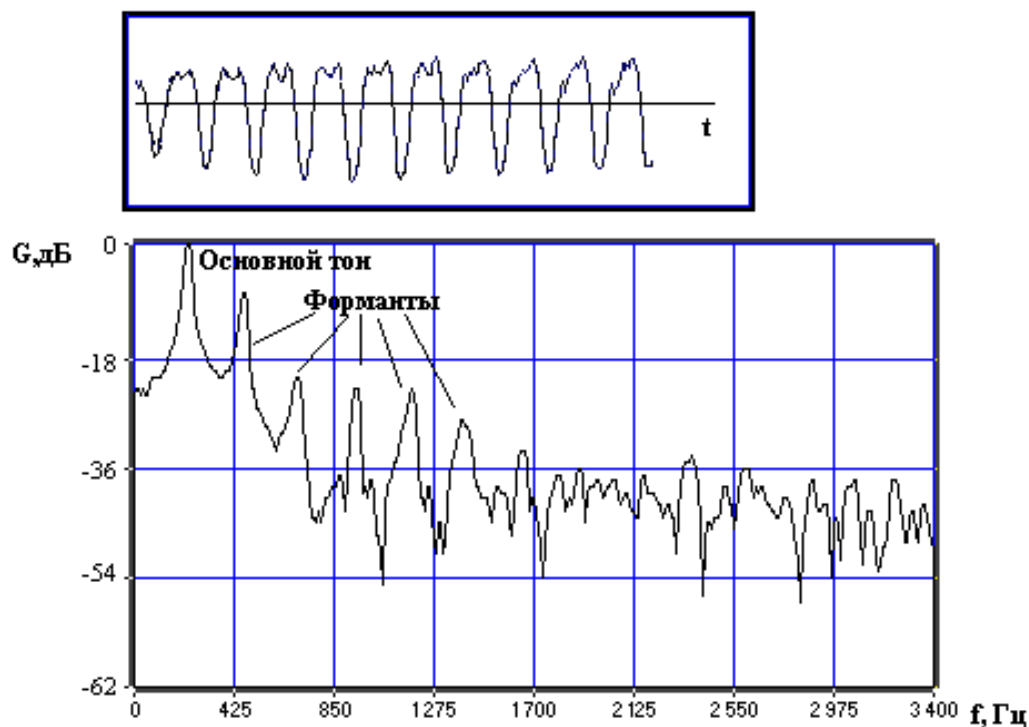


Рис. 1.1. Временная зависимость и спектр, соответствующие гласному звуку "и".

При произнесении глухих (не вокализованных) звуков голосовые складки расслаблены. Проходя по суженному голосовому тракту, воздух создает турбулентный поток. Полости рта и носа возбуждаются при этом шумоподобным сигналом. На рис. 1.2 показаны временная зависимость и спектр, соответствующие глухому согласному звуку "с". Сигнал не содержит периодических составляющих и подобен шуму; в спектре отсутствуют форманты и основной тон.

Взрывные (смычные) звуки получаются путем кратковременного выхлопа - полного перекрытия речевого тракта, нагнетания давления и внезапного открытия тракта. Взрывные звуки бывают звонкие (б, д, г) и

глухие (п, т, к), то есть могут образовываться с участием голосовых складок и без них.

Частота импульсов основного тона ( $f_0$  на рис. 1.3) лежит в пределах от 50..80 Гц (бас) до 200..250 Гц (женский и детский голоса) [9]. Импульсы основного тона содержат большое число гармоник (до 40) ( $2f_0, \dots, nf_0$  на рис. 1.3), причем их амплитуды убывают с увеличением частоты со скоростью приблизительно 12 дБ на октаву (кривая 1 на рис. 1.3). Октавой называется диапазон частот, верхняя частота которого в два раза выше нижней. Таким образом амплитуда гармоники  $2f_0$  на 12 дБ больше, чем гармоники  $4f_0$  и т.д.). При разговоре частота основного тона  $f_0$  меняется в значительных пределах.

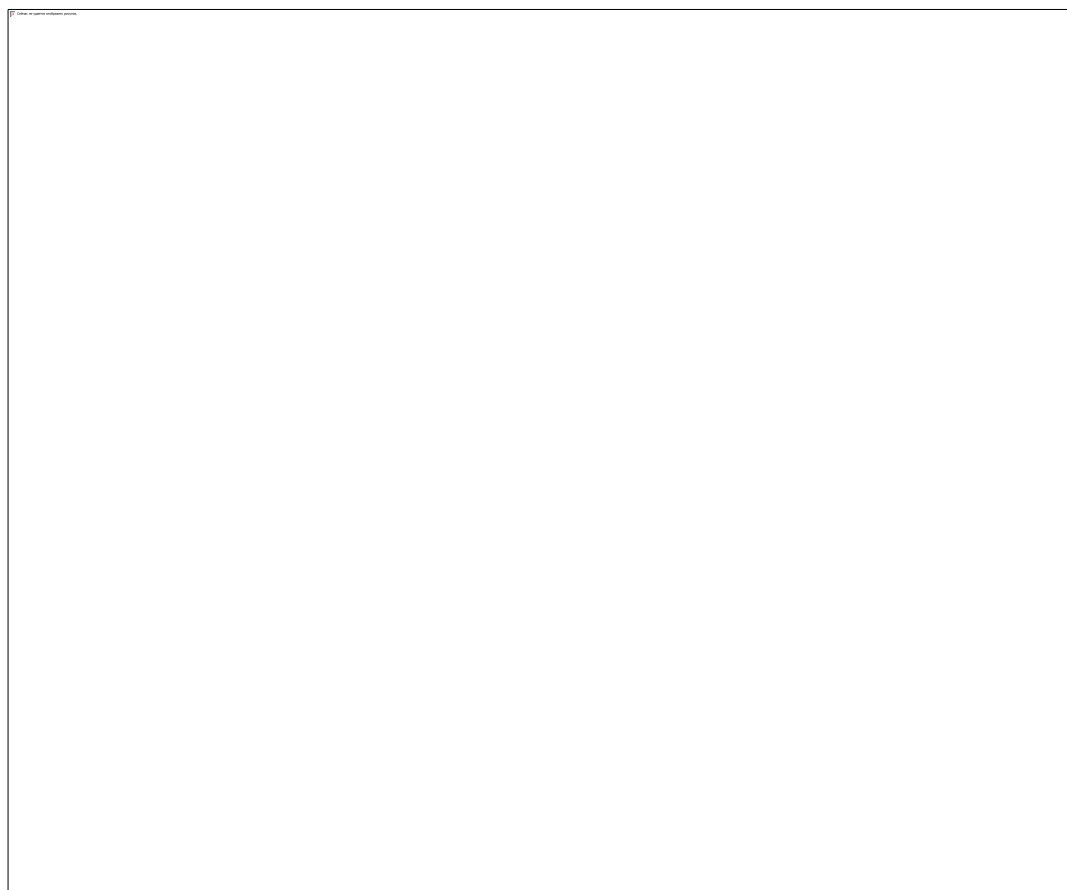


Рис. 1.2. Временная зависимость и спектр, соответствующие согласному звуку "с".

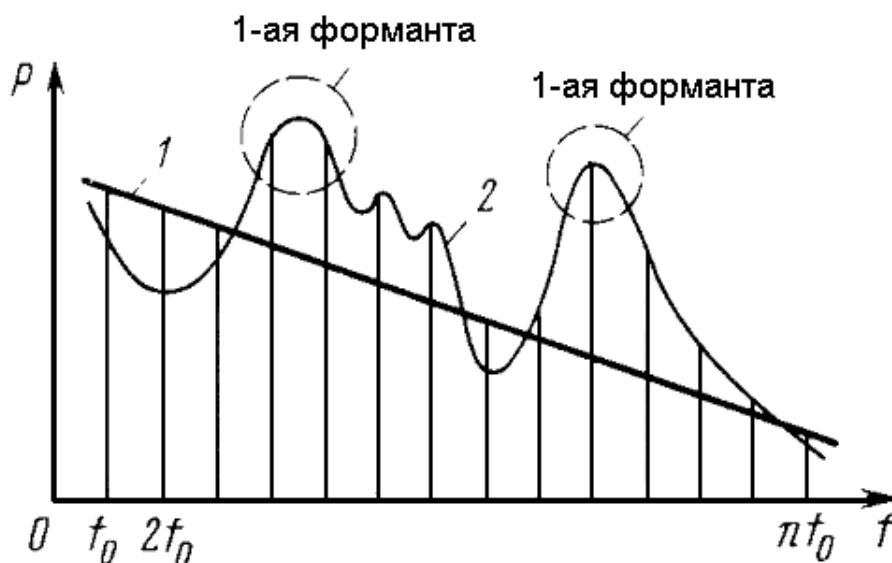


Рис.1.3. Спектральный состав речевого сигнала.

В процессе прохождения воздушного потока из легких через голосовые связки и полости рта и носа образуются звуки речи, причём мощность гармоник частоты основного тона меняется (кривая 2 на рис. 1.3). Области повышенной мощности гармоник частоты основного тона называются формантами (см. рис. 1.3). Различные звуки речи содержат от двух до четырех формант. Высокое качество передачи телефонного сигнала характеризуется уровнем громкости, разборчивостью, естественным звучанием голоса, низким уровнем помех. Эти факторы определяют требования к телефонным каналам.

Сигналы телефонирования представляют собой последовательности речевых импульсов, отделенных друг от друга паузами. Импульсы соответствуют звукам речи, произносимым слитно, и весьма разнообразны по форме и амплитуде. Длительности отдельных импульсов также отличаются друг от друга, но обычно они близки к 100...150мс [10]. Паузы между импульсами изменяются в значительно большем диапазоне: от нескольких миллисекунд (межслоговые паузы) до нескольких минут или даже десятков минут — паузы при выслушивании ответа собеседника.

Как уже упоминалось выше, частотный спектр речевого сигнала очень широк, однако экспериментально было установлено, что для передачи с достаточно высоким качеством (удовлетворительной натуральностью и разборчивостью слогов 90% и фраз 99%) можно ограничиться полосой частот 0,3...3,4кГц (300...3400Гц).

Отношение

$$Y_{\text{тф}} = 10 \lg (P_{\text{тф}} / P_{\text{изм}}), \text{ дБм.0} \quad (1.1).$$

называется динамическим уровнем (волюмом);

где:

$P_{\text{тф}}$  – мощность сигнала усредненная за время наблюдения  $T_{\text{н}}$ ,

$P_{\text{изм}}$  – мощность измерительного сигнала в точке тракта где проводится исследование.

Согласно рекомендациям МККТТ волюмы измеряются специальным прибором волюметром обеспечивающим квадратичный закон суммирования колебаний различных частот имеющим логарифмическую шкалу (в дБ) и постоянную времени (время интегрирования)  $T_{\text{н}} = 200\text{мс}$ . Статистическими исследованиями установлено, что распределение волюмов подчиняется гауссовому закону со средним значением  $Y_{\text{тф}} = -12,7 \text{ дБм0}$  и среднеквадратическим отклонением  $\sigma_y = 4,3 \text{ дБ}$  [10].

То есть,

$$W(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} e^{-\frac{(y_{\text{тф}} - y_{\text{тф ср}})^2}{2\sigma_y^2}} \quad (1.2).$$

В данной работе мы не ставим себе целью показать, как вычисляются все основные параметры сигнала телефонирования, поэтому просто перечислим их и дадим численные значения. Итак, основными параметрами телефонного сигнала являются [9, 10]:

- мощность телефонного сигнала  $P_{\text{тлф}}$ . Согласно данным МСЭ-Т средняя мощность телефонного сигнала в точке с нулевым измерительным уровнем на интервале активности составляет 88 мкВт. С учетом коэффициента

активности (0,25) средняя мощность телефонного сигнала  $P_{CP}$  равна 22 мкВт. Кроме речевых сигналов в канал связи могут поступать сигналы управления, набора номера и пр. С учетом этих сигналов среднюю мощность телефонного сигнала принимают равной 32 мкВт, т.е. средний уровень телефонного сигнала составляет

$$P_{CP} = 10 \lg (32 \text{ мкВт}/1\text{мВт}) = - 15 \text{ дБм0};$$

- коэффициент активности телефонного сообщения, т.е. отношение времени, в течение которого мощность сигнала на выходе канала превышает заданное пороговое значение, к общему времени занятия канала для разговора. При разговоре каждый из собеседников говорит приблизительно 50% времени. Кроме того, отдельные слова, фразы отделяются паузами. Поэтому коэффициент активности составляет 0,25..0,35.

- динамический диапазон определяется выраженным в децибелах отношением максимальной и минимальной мощности сигнала  $D_{с\text{ тф}} = 10 \lg(P_{\text{max}}/P_{\text{min}})$ , дБ

Динамический диапазон телефонного сигнала составляет  $D_{с\text{ тф}} = 35...40$  дБ.

- Величина пик-фактора сигнала определяется по формуле

$$Q_{\text{тф}} = 10 \lg(P_{\text{тф макс}}/P_{\text{тф}}) = 20 \lg(U_{\text{огр}}/u_{\text{тф}}) \quad (1.3)$$

где:

$u_{\text{тф}}$  – эффективное (среднеквадратическое) напряжение сигнала  $u(t)$ ;

$U_{\text{огр}}$  – значение напряжения ограничения, вероятность превышения которого  $\epsilon \leq 10^{-3}$ .

Если принять, что  $U_{\text{огр}} \approx 5u_{\text{тф}}$ , то  $Q_{\text{тф}} \approx 14$  дБ.

#### **1.4. Классификация помех, присутствующих в каналах мобильной связи**

Как уже указывалось ранее, одним из основных факторов, приводящих к значительному снижению качества передачи речевой информации по каналам мобильной связи, является эффект электрического эха. Причины

его возникновения, характер и степень его мешающего воздействия подробно изучены как отечественными, так и зарубежными исследователями [1-3,].

Каждое из разработанных ранее и разрабатываемых в настоящее время специальных устройств, предназначенных для подавления эхосигналов, несмотря на разнообразие предлагаемых конструктивных решений, реализует определенный метод, на основе которого происходит устранение мешающего воздействия эхосигнала. Методы эхоподавления классифицируют по тому, каким образом достигается необходимая степень подавления эхосигнала.

Как известно [1], наибольшее мешающее воздействие оказывает так называемое первое эхо «говорящего». В обобщенном виде степень подавления этого эхосигнала  $\mathbf{a}_э$  можно представить, как

$$\mathbf{a}_э = \mathbf{a}_{пр} + \mathbf{A}_{едс} + \mathbf{a}_{обр}, \quad (1.4)$$

где:  $\mathbf{a}_{пр}$ ,  $\mathbf{a}_{обр}$  - соответственно остаточные затухания прямого и обратного направлений передачи;  $\mathbf{A}_{едс}$  - переходное затухание дифференциальной системы (ДС) телефонного канала.

Метод подавления эхосигналов, при котором поддерживается постоянной и достаточно большой величина  $\mathbf{A}_{едс}$ , получил название метода самобалансирующейся ДС (СДС).

Метод эхокомпенсации предполагает увеличение до необходимой величины остаточного затухания обратного направления передачи  $\mathbf{a}_{обр}$  только для эхосигнала. Для информационного сигнала величина  $\mathbf{a}_{обр}$  остается неизменной.

Метод эхозаграждения характеризуется тем, что величина  $\mathbf{a}_{обр}$  возрастает одновременно для эха и информационного сигнала.

Каждому из перечисленных методов эхоподавления присущи определённые преимущества и недостатки, соотношение которых определяет применимость того или иного метода эхоподавления на практике.

Кроме перечисленного вида помех в каналах мобильной связи



присутствуют помехи внятного переходного разговора, а так же помехи гладкого шума. Следовательно, суммарная мощность помех определяется выражением:

$$P_{\text{ПОМ.сумм.}} = \alpha_1 P_{\text{эхо.}} + \alpha_2 P_{\text{ц.тр.}} + \alpha_3 P_{\text{гл.ш.}} \quad (1.5).$$

где:  $P_{\text{ПОМ.сумм.}}$  – суммарная мощность помех;

$P_{\text{эхо.}}$  – помеха электрического эха;

$\alpha_1$  - весовой коэффициент, равный 0,5;

$P_{\text{ц.тр.}}$  – помеха цифрового тракта передачи;

$P_{\text{гл.ш.}}$  – помеха гладкого шума;

$\alpha_2$  и  $\alpha_3$  - весовые коэффициенты, равные 0,25.

## 1.5. Качество услуг телефонной сети мобильной связи

### 1.5.1. Концепция качества услуг

Качество обслуживания (Quality of Service, QoS) – суммарный эффект показателей службы, определяющий степень удовлетворенности пользователя обслуживанием (рекомендация ITU-T E.800 [5]).

Рассмотрим иерархию понятий в области качества телекоммуникационных услуг по этой рекомендации.

Качество обслуживания QoS включает в себя следующие понятия:

1. **Обеспеченность (Service Support Performance)** – способность оператора связи предоставлять набор услуг и оказывать помощь пользователю в их использовании;
2. **Удобство пользования (Service Operability Performance)** – свойство обслуживания, состоящее в простоте использования;
3. **Безопасность (Service Security Performance)** – свойство обслуживания быть защищенным от несанкционированного доступа, злонамеренного и неправильного использования, преднамеренной порчи, стихийных бедствий и человеческих ошибок;

4. **Действительность (Serveability)** – свойство обслуживания, состоящее в предоставлении услуги на время сеанса всегда, когда это необходимо пользователю.

4.1. **Доступность (Service Accessibility Performance)** – свойство обслуживания быть предоставленным в любом месте и в момент, когда это необходимо пользователю;

4.2. **Бесперебойность (Service Retainability Performance)** – способность оператора в определенных условиях эксплуатации обеспечивать предоставленное обслуживание без перерывов в течение требуемого промежутка времени;

4.3. **Целостность (Service Integrity Performance)** – способность оператора предоставить услугу без существенного ухудшения качества передачи (адекватность информации пользователя при транспортировке через сеть).



Рис.1.4. Взаимосвязь потребностей пользователя услуг, QoS и NP.

Характеристики (параметры) сети определяют качество обслуживания, воспринимаемое пользователем, но далеко не всегда позволяют содержательно с точки зрения пользователя описать это качество. Примерами таких характеристик сети могут быть: трафик, потери по вызовам, по времени на участке сети, коэффициент эффективных вызовов направления связи и др. Связь между QoS и NP мы можем увидеть на Рис.1.4 [1, 11]. Различия между QoS и NP представлены в таблице 1.2. [12].

Таблица 1.2. Различия между качеством обслуживания и характеристиками сети.

Качество обслуживания (QoS)	Характеристики сети (NP)
Ориентировано на пользователя	Ориентированы на оператора сети
Описывается атрибутами услуги	Описываются атрибутами элемента соединения
Ориентировано на эффект, воспринимаемый пользователем	Ориентированы не на разработку, проектирование, эксплуатацию и техническое обслуживание

### 1.5.2. Концепция характеристик сети.

Качество функционирования телекоммуникационной сети (Network Performance) – это способность обеспечивать информационный обмен между пользователями. Основные характеристики сети перечислены в следующем списке:

1. **Эффективность обслуживания трафика (пропускная способность)** – свойство узла коммутации как объекта сети обслуживать поступающий трафик с заданной интенсивностью при заданном качестве обслуживания и определенном техническом состоянии (соотношении количества работоспособных и неработоспособных

каналов/линий). Способность узла коммутации обслуживать трафик зависит от его надежности, качества передачи и имеющихся ресурсов и возможностей. Это основная характеристика телекоммуникационной сети.

2. **Качество передачи** – уровень воспроизведения сигнала в пункте приема объектом сети, находящимся в состоянии готовности.
3. **Надёжность** – собирательный термин, используемый для описания свойства готовности и влияющих на него свойств безотказности, ремонтпригодности, обеспечения технического обслуживания и ремонта.
4. **Готовность** – способность объекта сети обрабатывать трафик в произвольный момент времени (кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается) и, начиная с этого момента, работать безотказно в течение заданного интервала времени.
5. **Безотказность** – свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение определенного времени.
6. **Ремонтпригодность** – свойство объекта сети, заключающееся в приспособленности к предупреждению и обнаружению причины отказов и восстановлению работоспособного состояния путем проведения технического обслуживания и ремонта.
7. **Обеспечение технического обслуживания и ремонта** – способность служб оператора обеспечивать средства для технического обслуживания (ТО) объектов сети (при определенных условиях эксплуатации и принятом способе ТО).

Каждое из свойств может быть описано набором характеристик (показателей, атрибутов). Так, например, готовность к обслуживанию определяется характеристиками: среды распространения, работоспособности оборудования, пропускной способности станций и узлов сети.

Каждая характеристика связана с одним или несколькими событиями, состояниями или действиями. Вся совокупность характеристик (атрибутов) качества обслуживания и функционирования сети делится на две категории:

1. **Первичные**, определяемые путем прямого наблюдения в точке доступа к услуге и относящиеся к какому-либо моменту времени (например, задержка ответа станции);
2. **Производные**, определяемые на основании одного или нескольких первичных атрибутов или усредненные за некоторый интервал времени (например, коэффициент готовности).

### **1.5.3. Перечень показателей качества услуг подвижной связи.**

#### **1. Доступность.**

- 1.1. Суммарные потери от абонента до абонента в пределах сети оператора.
- 1.2. Время установления соединения.
- 1.3. Потери на направлениях связи станции (узла).
- 1.4. Доля состоявшихся разговоров (эффективные попытки соединений).
- 1.5. Число попыток вызова на один разговор.
- 1.6. Оценка доступности услуги в баллах.
- 1.7. Доля абонентов, удовлетворенных доступностью услуги.

#### **2. Бесперебойность.**

- 2.1. Процент прерывания установленных соединений (к общему количеству установленных соединений).
- 2.2. Оценка бесперебойности в баллах.
- 2.3. Процент абонентов, удовлетворенных бесперебойностью.

#### **3. Качество передачи.**

- 3.1. Оценка качества передачи речевой информации или данных в баллах.
- 3.2. Доля абонентов, удовлетворенных качеством передачи речевой информации или данных.

#### **4. Качество обслуживания.**

- 4.1. Процент жалоб, рассмотренных в контрольные сроки.
- 4.2. Среднее время рассмотрения жалоб клиентов.
- 4.3. Оценка качества обслуживания абонентов в баллах.
- 4.4. Доля абонентов, удовлетворенных качеством обслуживания.

**5. Надежность (готовность).**

- 5.1. Среднее время работы до отказа стационарного оборудования.
- 5.2. Среднее время восстановления стационарного оборудования.
- 5.3. Среднее время работы до отказа канала межстанционной связи.
- 5.4. Среднее время восстановления канала связи.
- 5.5. Коэффициент готовности стационарного оборудования.
- 5.6. Коэффициент готовности канала.
- 5.7. Время неготовности службы сети в течение года.

Данный перечень показателей качества услуг предлагается органом по сертификации «Интерэкомс» для подвижной связи.

Цели сертификации телекоммуникационных услуг таковы [12]:

- 1. Создание условий для предоставления услуг связи и информационных технологий на едином рынке услуг РФ;
- 2. Создание условий для участия операторов телекоммуникационных сетей в международном экономическом и научно-техническом сотрудничестве;
- 3. Содействие потребителям в компетентном выборе исполнителей телекоммуникационных услуг;
- 4. Защита потребителей от предоставления услуг несоответствующего качества;
- 5. Подтверждение соответствия фактических характеристик услуг, заявленным нормативным требованиям.

Лицензирование деятельности операторов и сертификация услуг предполагают проведение оценки качества телекоммуникационных услуг на соответствие нормативным документам. Оценку качества услуг могут выполнять исполнитель, потребитель или третья сторона.

Исполнитель оценивает качество услуги двумя способами:

1. В ходе внутренней проверки технической реализации предоставления услуги;
2. Путем эмуляции поведения пользователя, взаимодействующего со службой.

Потребитель оценивает качество услуги в процессе её предоставления.

Характерная черта его оценки – субъективность.

В качестве третьей стороны при проверке качества услуги могут выступать государственные органы, а также органы сертификации услуг.

Различают два вида сертификации услуг – обязательную и добровольную. Добровольная сертификация проводится на условиях договора между оператором (провайдером) и юридическим лицом (организацией по сертификации телекоммуникационных услуг), зарегистрировавшим в соответствующем порядке систему сертификации и знак соответствия в Госстандарте.

Добровольная сертификация направлена на повышение конкурентоспособности услуг и является эффективным рыночным инструментом, в котором заинтересовано как общество, так и государство. Минсвязи РФ ввело систему сертификации телекоммуникационных услуг, которая предусматривает как добровольную, так и обязательную сертификацию.

#### **1.6. Методы проведения испытаний качества услуг.**

Одновременно с формированием нормативной базы требуется создание комплекса методик для испытания качества услуг. Основой для такой работы являются методики, принятые в отрасли и нашедшие отображение в «Правилах технической эксплуатации» и других методических материалах отрасли, а также методики, рекомендуемые ИТУ-Т.

Показатели качества, включенные в нормативную базу, могут быть оценены различными методами:

1. опрос клиентов;
2. контрольные вызовы;
3. анализ статистических данных, хранящихся в памяти управляющего комплекса системы связи, анализ журналов повреждений;
4. анализ обращений клиентов;
5. измерения с помощью контрольно-измерительной аппаратуры (КИА).

### **1.6.1. Опрос клиентов**

Опрос клиентов проводится специально подготовленными операторами телекоммуникационной компании в соответствии с рекомендациями Е.432 Белой книги ИТУ-Т [12, 13].

Целью изучения мнения пользователей о качестве услуг, предоставляемых телекоммуникационной компанией, является реализация основного принципа политики в области качества – ориентирования общего руководства компании на пользователя.

Основным методом изучения мнения пользователей о качестве предоставляемых им услуг является метод опроса. При этом в зависимости от вида услуг используются два вида опроса:

1. По телефону;
2. Непосредственным контактом с пользователями.

Задача интервьюера – получить ответы, наиболее точно отражающие мнение опрашиваемого [12]. Поэтому он должен строго придерживаться вопросов анкеты и во время опроса оставаться нейтральным. Особое внимание должно быть обращено на произнесение оценочной шкалы (без ударения на отдельные оценки). Для примера в приложении 2 приведена выдержка из опросника по рекомендации ИТУ-Т Р.82 [14].

Для телефонного опроса должна быть сформирована репрезентативная случайная выборка абонентов/клиентов, подлежащих опросу. Из выборки должны быть исключены:



- Абоненты, которые были объектом предыдущего опроса;
- Абоненты, со стороны которых поступили заявки или жалобы на неудовлетворительную работу сети, но ее причины еще не устранены.

Выборка – любая подгруппа совокупности случаев (объектов), выделенная для анализа.

Репрезентативная выборка – это такая выборка, в которой все основные признаки генеральной совокупности, из которой извлечена данная выборка, представлены приблизительно в той же пропорции, или с той же частотой, с которой данный признак выступает в этой генеральной совокупности [15].

Необходимая процедура определения объема выборки будет рассмотрена в приложении П.1.

По каждому выбранному абоненту должны иметься следующие данные, необходимые для опроса:

- номер телефона;
- сектор, к которому относится абонент (квартирный, деловой).

Дополнительным видом изучения мнений пользователей является обзор жалоб на некачественное обслуживание.

### **Оценка качества речи по шкале MOS**

Правильный выбор шкалы оценок пользователями качества предоставляемых услуг является важным элементом процесса изучения мнения пользователей.

В рекомендации ITU-T E.432 предложено оценку результатов опроса пользователей/клиентов производить по усредненному мнению (Mean Opinion Score, MOS) [12, 13]. Сущность метода состоит в том, что результаты опроса пользователей или экспертов разделяют на 5 уровней (см. табл. 1.3. [3]). Наличие промежуточных уровней позволяет снизить количество ответов «не знаю». Опрос должны производить интервьюеры.

Таблица 1.3. Шкала оценок пользователями качества услуг связи.

Оценка	Шифр	Характеристика качества разговора
Отлично	Excellent (4)	Полное отсутствие напряженности при разговоре
Хорошо	Good (3)	При разговоре следует приложить внимание, но не требуется никаких заметных усилий
Довольно хорошо	Fair (2)	При разговоре требуется постоянное, но не исключительное напряжение внимания
Посредственно	Poor (1)	Разговор возможен, но испытываются большие затруднения, особенно при передаче необычных слов
Плохо	Bad (0)	Разговор если и возможен, то с очень большими трудностями

По результатам опроса вычисляем среднее арифметическое числовых значений оценок, выставленных всеми респондентами [3]:

$$MOS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_i \quad (1.6)$$

Получен процент удовлетворенных абонентов, представляющий собой отношение числа оценок «отлично» и «хорошо» (E + G) или «довольно хорошо» (E + G + F) к общему числу оценок.

При определении процента удовлетворенных абонентов исходят из того, что оценки абонентов являются дискретными величинами, распределенными по биномиальному закону. Тогда вероятность появления каждой градации оценки при данном среднем его значении MOS может быть определена по формуле

$$P(x) = \frac{n!}{x!(n-x)!} p^x (1-p)^{n-x} \quad (1.7)$$

где: n = 4 – число категорий оценок минус единица;

$x$  – соответствующие числовые выражения оценок по пятибалльной шкале (0, 1, 2, 3, 4);

$p$  – число, представляющее собой частное от деления средней оценки на число категорий.

На основании данных вычислений можно построить кривые кумулятивного распределения оценок качества услуги [12, 13] – рис.1.5.

Контрольные вызовы при проведении оценочных испытаний контролирующими органами, лабораториями и центрами сертификации, основным методом испытаний является метод контрольных вызовов [11].

Контрольный вызов – вызов, инициируемый при испытании специализированными техническими средствами [4].

С помощью контрольных вызовов можно оценить показатели доступности, например «Время установления соединения». Контрольные вызовы для определения показателей качества услуг сотовых и транкинговых сетей подвижной радиотелефонной связи могут проводиться из движущегося автомобиля. Предварительно выбираются маршруты движения с таким расчетом, чтобы охватить, по возможности, большее число районов, обслуживаемых сетью [12].

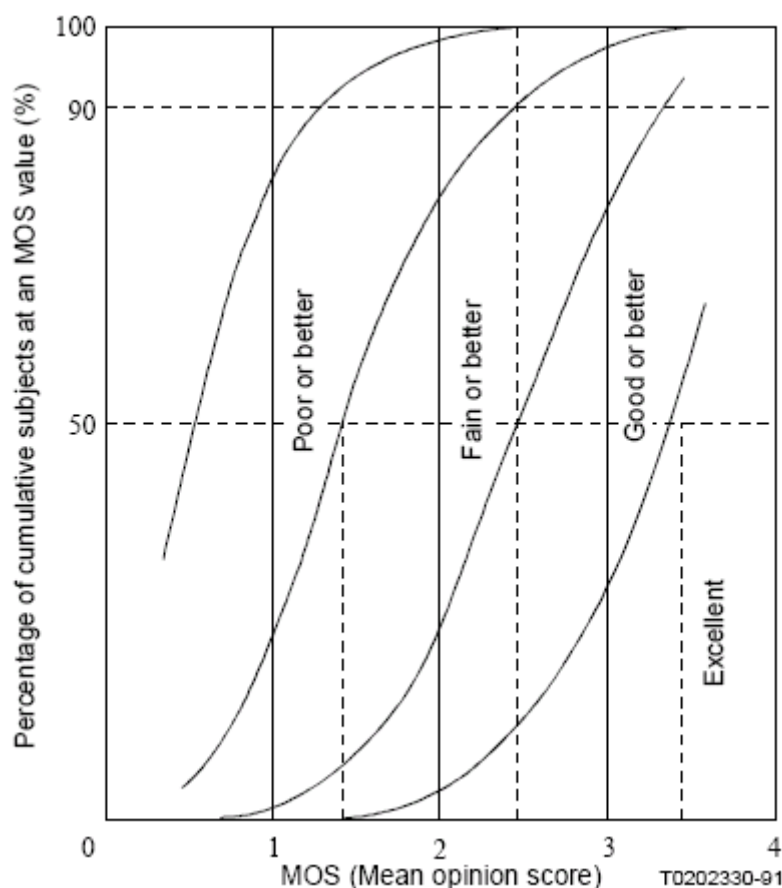


Рис.1.5. Кривые кумулятивного распределения оценок.1.2.4.2.

Продолжительность испытаний определяется организацией, проводящей испытания, согласуется с оператором мобильной связи и зависит от емкости сети и лицензионной территории обслуживания оператора мобильной связи.

Программа проведения сертификационных испытаний должна содержать следующие пункты:

- Название компании-оператора мобильной связи, лицензионную территорию обслуживания, виды нумерации, количество абонентов, подключенных к его сети, диапазон используемых частот, стандарт.
- Организационно-техническую структуру сети, тип используемого оборудования (включая количество базовых станций и центров коммутации мобильной связи).
- Организацию сбора и обработки данных статистичности по данному

документу.

- Перечень оцениваемых показателей качества услуг.
- Перечень измерительного оборудования (тип оборудования, владелец оборудования, срок аттестации).
- График проведения сертификационных испытаний (дата начала и окончания испытаний, периодичность фиксации информации, продолжительность сеансов испытаний).
- План проведения сертификационных испытаний, который содержит перечень объектов испытаний, перечень направлений связи для проведения контрольных вызовов, количество контрольных вызовов и маршрут передвижения.

Контрольные вызовы должны обеспечивать возможность оценки показателей качества для соединений в трех направлениях [11]:

1. Внутренних направлениях сети мобильной связи с учётом всех возможных маршрутов установления соединения (между двумя абонентами сети мобильной связи);
2. Направлениях от мобильной сети к местной ТфОП с учётом всех возможных маршрутов установления соединения через мобильную сеть (между абонентами мобильной сети и ТфОП), включая направления на узлы спецслужб;
3. Направлениях от мобильной сети к АМТС ТфОП с учётом всех возможных маршрутов установления соединения через мобильную сеть (между абонентами мобильной сети и АМТС ТфОП).

Все направления связи должны быть протестированы за период, регламентированный программой испытаний, не менее одного раза. Контрольные вызовы производятся с абонентской станции и наблюдаются на центре коммутации (ЦК мобильной связи). По результатам испытаний, на основании составленного протокола, составляется акт о соответствии сети мобильной связи определенному документами уровню качества услуг.

Требуемое количество контрольных вызовов определяется для каждого оцениваемого показателя качества в зависимости от выбранной точности оценки и нормативного значения измеряемого показателя качества в соответствии с Таблицей 1.4.

Таблица 1.4. Выбор числа контрольных вызовов для данной точности оценки.

Нормативное значение показателя качества	Число контрольных вызовов при выбранной точности оценки		
	5 %	10 %	20 %
0,010	39600	9900	2500
0,015	26200	6500	1600
0,020	19600	4900	1200
0,025	15600	3900	1000
0,030	12900	3200	800
0,035	11000	2700	700
0,040	9600	2400	600
0,050	7500	1900	500

В случае автоматизированной проверки должна быть обеспечена точность не менее 10 %. В случае неавтоматизированной (ручной) проверки должна быть обеспечена точность не менее 20 %.

Количество возможных маршрутов соединений зависит от структуры сети. Возможные маршруты приведены в таблицах 1.5 – 1.7.

Таблица 1.5. Маршруты соединений внутри сети мобильной связи.

БС – ЦК СПС – БС
БС – ЦК СПС – ТЦК СПС – ЦК СПС – БС
БС – ЦК СПС – ЛЦК – ТЦК – ЦК СПС – БС
БС – ЦК СПС – транзитная сеть – ЦК СПС – БС
БС – ЦК СПС – ЦК СПС – БС
БС – ЦК СПС – транзитная сеть – МЦК (МНТС) (АО)
БС – ЦК СПС – МЦК (МНТС) (АО)

Таблица 1.6. Маршруты соединений мобильная сеть – ТфОП (АТС).

БС – ЦК – АМТС – УИВС ГТС (АТС) (АО)
БС – ЦК – ЛЦК – АМТС – УИВС ГТС (АТС) (АО)
БС – ЦК – ТУЭ – АТС (АО)
БС – ЦК – ЛЦК – ТУЭ – АТС (АО)
БС – ЦК – ЛЦК – АТСЭ (АО)

Таблица 1.7. Маршруты соединений мобильная сеть – АМТС.

БС – ЦК – АМТС (АО)
БС – ЦК – транзитная сеть – АМТС (АО)
БС – ЦК – МЦК (МНТС) (АО)
БС – ЦК – транзитная сеть – МЦК (МНТС) (АО)

На основании анализа результатов испытаний по протоколу составляется акт о соответствии сети мобильной связи нормативному уровню качества услуг.

Контрольные вызовы производятся с мобильных тестовых комплексов или с испытательных абонентских станций на телефонные аппараты (автоответчики), установленные на АТС ТфОП, или на другие мобильные

тестовые комплексы или испытательные абонентские станции. Контрольные вызовы, проводимые с тестовых комплексов, фиксируются автоматически специальной измерительной аппаратурой на долговременном носителе, а вызовы, проводимые с испытательной абонентской мобильной станции, фиксируются в соответствии с формой, приведенной в приложении 3.

Контрольные вызовы проводятся в периоды повышенной нагрузки, включая общесетевой ЧНН (определяется по данным статистики оператора мобильной связи). Испытания проводятся в процессе передвижения абонентской станции «А» внутри зоны обслуживания сети на абонентскую станцию «В», находящуюся поочередно в зоне действия различных базовых станций сети мобильной связи.

Выбор объектов для испытаний параметров выполняется в соответствии с таблицей 1.8. [11]. Объекты испытаний выбираются в местах наибольшего скопления абонентов и вблизи крупных промышленных предприятий.

Таблица 1.8. Выбор объектов для испытаний.

Число БС сети мобильной связи	До 20	От 20 до 50	От 50 до 100	От 100 до 200	От 200 до 500	Свыше 500
Число объектов испытаний, %	100	Не менее 50	Не менее 40	Не менее 30	Не менее 15	Не менее 5

### 1.6.2. Анализ статистических данных

При оценке качества услуг широко используются статистические методы. Под статистическими методами понимаются выборочные методы, основанные на применении теории вероятностей и математической статистики, позволяющие получить обобщающие характеристики



показателей путем определения средних величин и предельной ошибки для средних величин [12].

Статистические методы по ограниченному числу наблюдений позволяют принимать обоснованные решения о качестве услуг в целом. Для наглядности при обработке статистических данных используются табличные и графоаналитические способы представления полученных материалов. Например, для расчета показателей готовности используют статистические данные о простоях оборудования, неготовности систем и сетей связи.

Методы анализа статистических данных также используются для расчета ряда показателей доступности (процент отказов, эффективные попытки соединений и др.), качества передачи (коэффициент ошибок) и других показателей, характеризующих качество предоставляемых услуг связи.

#### **Показатели, характеризующие качество обслуживания вызовов.**

Показатели, характеризующие качество обслуживания вызовов, определяются по формулам:

**Вероятность потерь по вызовам  $P_B$**  вычисляют с помощью параметров, характеризующих качество обслуживания вызовов по формуле:

$$P_B = \frac{N_{ПВ} + N_{ЗВ}}{N}, \quad (1.8)$$

где:

$N_{ПВ}$  – количество вызовов, потерянных из-за повреждений оборудования;

$N_{ЗВ}$  – количество вызовов, потерянных из-за занятости соединительных линий или приборов коммутационного оборудования;

$N$  – количество поступивших вызовов.

#### **Вероятность потерь по вызовам из-за повреждений оборудования**

**$P_{П}$ :**

$$P_{\Pi} = \frac{N_{\Pi B}}{N}, \quad (1.9)$$

где:

$N_{\Pi B}$  – количество вызовов, потерянных из-за повреждений оборудования;

$N$  – количество вызовов, поступивших на элемент сети в направлении связи.

**Вероятность потерь по вызовам из-за занятости соединительных линий или коммутационного оборудования  $Q_3$ :**

$$Q_3 = \frac{N_{3B}}{N}, \quad (1.10)$$

где:

$N_{3B}$  – количество вызовов, потерянных из-за занятости соединительных линий или приборов коммутационного оборудования;

$N$  – количество вызовов, поступивших на элемент сети в направлении связи.

**Вероятность потерь по времени  $P_t$ :**

$$P_t = \frac{t_{HO}}{t}, \quad (1.11)$$

где:

$t_{HO}$  – время, в течение которого телефонный вызов не может быть обслужен;

$t$  – величина всего контролируемого промежутка времени.

**Коэффициент вызовов с ответом  $K_{BO}$ :**

$$K_{BO} = \frac{N_{BO}}{N}, \quad (1.12)$$

где:

$N_{BO}$  – количество вызовов, окончившихся сигналом «Контроль посылки вызова» или «Занято»;

$N$  – общее количество вызовов.

**Коэффициент эффективности вызовов  $K_{ЭВ}$ :**

$$K_{ЭВ} = \frac{N_{BP}}{N}, \quad (1.13)$$

где:

$N_{BP}$  – количество вызовов, закончившихся разговором;

$N$  – общее количество вызовов.

**Коэффициент неэффективности вызовов  $K_{HP}$ :**

$$K_{HP} = \frac{N_{HP}}{N}, \quad (1.14)$$

где:

$N_{HP}$  – количество вызовов, не закончившихся разговором из-за занятости абонентской линии или отсутствия ответа вызываемого абонента;

$N$  – общее количество вызовов.

**Вероятность отказа в установлении соединения  $P_o$ :**

$$P_o = \frac{Q}{N}, \quad (1.15)$$

где:

$Q$  – число безуспешных попыток доступа к соединению;

$N$  – общее число попыток доступа к соединению за период измерения.

**Вероятность преждевременного разъединения установленного соединения  $P_p$ :**

$$P_p = \frac{R}{N} \quad (1.16)$$

где:

$R$  – число соединений с преждевременным разъединением;

$N$  – общее число соединений, последовательно установленных за период измерений.

### **Показатели, характеризующие качество работы бюро ремонта.**

Показатели, характеризующие качество работы бюро ремонта определяются с помощью соответствующих параметров по формулам:

Доля заявлений на обслуживание, выполненных в установленные сроки  $Y_y$ :

$$Y_y = \frac{N_y}{N_o}, \quad (1.17)$$

где:

$N_y$  – количество заявлений, выполненных в установленные сроки;

$N_o$  – общее количество заявлений за отчетный период.

Доля абонентов, не удовлетворенных качеством предоставления связи  $A_H$ :

$$A_H = \frac{N_H}{N_o}, \quad (1.18)$$

где:

$N_H$  – количество абонентов, не удовлетворенных качеством услуги;

$N_o$  – общее количество опрошенных абонентов.

### **Коэффициент восстановления связи $P_{вс}$ :**

$$P_H = \frac{N_{кв}}{N_в}, \quad (1.19)$$

где:

$N_{кв}$  – число заявок на восстановление связи, выполненных в нормативные сроки;

$N_в$  – общее число выполненных заявок на восстановление связи.

**Доля неправильно тарифицированных соединений  $R_{нт}$ :**

$$R_{нт} = \frac{N_{нт}}{N_c} \cdot 100\%, \quad (1.20)$$

где:

$N_{нт}$  – количество неправильно тарифицированных соединений;

$N_c$  – общее количество счетов.

**Показатель удовлетворенности организационными аспектами обслуживания  $R_{орг.жалоб}$ :**

$$R_{орг.жалоб} = \frac{N_{орг.жалоб}}{N_{аб.сети}} \cdot 100\%, \quad (1.21)$$

где:

$N_{орг.жалоб}$  – количество жалоб на организационные аспекты обслуживания;

$N_{аб.сети}$  – количество абонентов в сети, зарегистрированных к моменту произведения расчета.

**Показатель удовлетворенности техническими аспектами обслуживания  $R_{техн. жалоб}$ :**

$$R_{техн.жалоб} = \frac{N_{техн.жалоб}}{N_{аб.сети}} \cdot 100\%, \quad (1.22)$$

где:

$N_{техн.жалоб}$  – количество жалоб на технические аспекты обслуживания;

$N_{аб.сети}$  – количество абонентов в сети, зарегистрированных к моменту произведения расчета.

**Показатель, характеризующий конфиденциальность разговоров – доля нарушений разговоров из-за посторонних подсоединений  $R_{конф}$ :**

$$R_{\text{конф}} = \frac{N_{\text{конф}}}{N_o}, \quad (1.23)$$

где:

$N_{\text{конф}}$  – количество нарушений разговоров из-за посторонних подсоединений;

$N_o$  – общее количество нарушений разговоров за отчетный период.

### **Показатель, характеризующий качество передачи речи**

Доля вызовов, не удовлетворяющих нормативам по качеству передачи речи,  $R_{\text{п}}$ :

$$R_{\text{п}} = \frac{N_{\text{п}}}{N}, \quad (1.24)$$

где:

$N_{\text{п}}$  – общее суммарное число контрольных вызовов, не удовлетворяющих нормативам по качеству передачи речи, за все сеансы испытаний;

$N$  – общее количество контрольных вызовов.

### **Временные показатели**

Доля вызовов, не удовлетворяющих нормативам по величине времени задержки сигнала ответа  $P_{\text{зад}}$ :

$$P_{\text{зад}} = \frac{N_{\text{зад}}}{N}, \quad (1.25)$$

где:

$N_{\text{зад}}$  – общее число вызовов, не удовлетворяющих нормативам по величине задержки;

$N$  – общее количество вызовов за весь период испытаний.

Доля вызовов, не удовлетворяющих нормативам по величине времени задержки сигнала ответа определяется исходя из измерений параметра

времени задержки сигнала ответа, который измеряется с помощью специальной аппаратуры.

**Коэффициент времени восстановления связи  $P_{\text{восст}}$ :**

$$P_{\text{восст}} = \frac{M_{\text{восст.прев.}}}{M}, \quad (1.26)$$

где:

$M_{\text{восст.прев.}}$  – количество восстановлений связи, для которых время восстановления превысило нормативное значение;

$M$  – общее количество восстановлений связи за отчетный период.

**Время восстановления связи** – это период времени, требуемый для возобновления предоставления услуг в случае аварии или повреждения оборудования сети мобильной связи (неисправности в аппаратуре базовых станций или ЦК мобильной связи, повреждения на стыке сети мобильной и фиксированной связи и т.д.) – см. табл. 1.9.

Скорость ремонта определяется **коэффициентом восстановления связи**. Коэффициент восстановления связи характеризует скорость ремонта и оценивается по статистической отчетности оператора связи.

#### **Методы оценки показателей качества.**

Методы оценки показателей качества, методики проведения контроля при проведении сертификационных испытаний и при проведении внутреннего аудита оператором сети базируются на методиках, рекомендованных Министерством информационных технологий и связи РФ [11, 4, 29].

Испытания могут проводиться по двум уровням качества:

1. Нормальному уровню – уровню, необходимому для обеспечения качества услуг; соответствие проверяется органами Госсвязьнадзора. При выявлении несоответствия показателей качества услуг связи требуемым значениям при любых вышеперечисленных испытаниях сертификат,

подтверждающий уровень качества услуг, не выдается и проводятся испытания показателей качества работы сети мобильной связи с целью выявления недостатков и принятия решений, направленных на приведение в соответствие показателей качества нормативным значениям.

2. Высокому уровню – уровню, рекомендуемому для повышения качества услуг; проверяется органами добровольной сертификации услуг. Для достижения высокого уровня качества необходима стабильность значений показателей качества в процессе предоставления услуг мобильной связи. Стабильность проверяется при помощи проведения внутреннего аудита и служит основанием классификации уровней качества предоставляемых услуг. При добровольной сертификации услуг вводятся дополнительные показатели качества, определяемые операторской компанией.

В таблицах 1.8 и 1.9 приведены нормативные значения основных показателей, рассмотренных нами выше [11].



Таблица 1.8. Нормы на показатели качества основных услуг.

Показатель	Нормальный уровень	Высокий уровень
1. Доля неуспешных вызовов от общего числа вызовов. В том числе (ф. 1.6):		
1.1. При установлении соединения с абонентом мобильной сети, %	5	3
1.2. При установлении соединения с абонентом фиксированной сети (участок сети мобильной связи), %	2,5	1,5
2. Доля вызовов, не удовлетворяющих нормативам по качеству передачи речи, % (ф. 1.22)	5	2
3. Доля вызовов, окончившихся разъединением установленного соединения не по инициативе абонента, % (ф. 1.14)	5	2
4. Доля вызовов, не удовлетворяющих нормативам по величине времени задержки сигнала ответа, % (ф. 1.23)	5	2
5. Задержка сигнала ответа, с	10	8
6. Коэффициент восстановления связи, %	5	2
7. Доля неправильно тарифицированных соединений, % (ф. 1.18)	0,1	0,1
8. Показатель удовлетворенности техническими аспектами обслуживания, % (ф. 1.20)	1	0,5
9. Показатель удовлетворенности организационными аспектами обслуживания, % (ф. 1.19)	1	0,5

Таблица 1.9. Нормативное время восстановления связи.

Число БС сети мобильной связи	До 20	От 20 до 50	От 50 до 100	От 100 до 200	От 200 до 500	Свыше 500
Время восстановления связи, ч	2	2	4	4	6	6

### 1.6.3. Анализ обращений клиентов

Анализ обращений клиентов может использоваться для определения показателей готовности и качества обслуживания. В законе «О связи в РФ» [20] говорится, что при неисполнении или ненадлежащем исполнении обязательств по предоставлению услуг связи пользователь вправе предъявить оператору связи, предоставляющему услуги, претензии.

Обращения (жалобы, рекламации) поступают от абонентов, как в письменном, так и устном виде (по телефону или непосредственно при личном общении с персоналом).

На телекоммуникационном предприятии, как правило, существует документированная процедура по обработке поступивших обращений. Учетные данные обрабатываются, представляются в виде вариационных рядов и затем проводится расчет показателей качества услуг с применением специальных программ по формулам 1.17-1.22.

Анализ жалоб на технические аспекты обслуживания позволяет сделать выводы о неудовлетворительном качестве передаваемой речи, обрывах связи, невозможности выполнить соединение на том или ином участке сети, а следовательно, своевременно устранить появление «узких» мест, возникновение аварийных ситуаций и пересчитать производительность системы (формула 1.22).

Анализ жалоб, связанных с организационными вопросами обслуживания, дает дополнительное понятие о взаимодействии отдельных

служб и сети оператора в целом, дает возможность узнать мнение потребителя об абонентском обслуживании и пересмотреть политику оператора в области тарифов, рекламы и др. (формула 1.21).

#### **1.6.4. Контрольно-измерительная аппаратура**

Ряд характеристик качества услуг может быть определен только при использовании контрольно-измерительной аппаратуры (КИА). Следует учитывать, что метрологические характеристики КИА оказывают влияние на результаты и погрешность измерений.

Принципы построения системы тестирования качества функционирования сети связи содержатся в рекомендации E.434 и предусматривают наличие управляющего центра и некоторого набора тестовых модулей. В управляющем центре составляется график тестов, выполняется рассылка тестов и обработка результатов. Сами измерения и сбор результатов измерений проводятся путем проведения тестовых вызовов. Предусматриваются различные типы тестов [21]:

- тесты качества, обеспечивающие сбор статистических данных по качеству услуг связи и по различным аварийным ситуациям,
- тарификационные тесты, позволяющие протестировать разнообразные схемы создания тарификационных импульсов, обеспечить проверку всех действующих тарифных зон, тарификационных ставок и периодов переключения,
- тесты корректности работы тарификационной системы, предусматривающие генерацию вызовов с заранее заданной длительностью и последующего сравнения с суммой, указанной в счете, соответствующем этим тестовым вызовам, как если бы этот счет был выставлен на самом деле поставщиком услуги,
- тесты «меченных вызовов», прослеживающие путь вызова и

возможные ситуации для специальных дополнительных измерений и для выявления некоторых проблем на сети, которые требуют дополнительного сбора данных.

В процессе реализации контрольных вызовов анализируются следующие параметры:

- частота и уровень акустических зуммерных и вызывных сигналов.
- задержка поступления сигнала готовности.
- интервал между концом набора номера и первым сигналом передачи вызова.
- время проключения разговорного тракта.
- время разъединения.
- задержка поступления сигнала “ЗАНЯТО” после отбоя одного из абонентов.
- амплитудно-частотная характеристика разговорного тракта (АЧХ).
- стабильность разговорного тракта.
- уровень шумов в разговорном тракте.
- правильность формирования тарифных импульсов;
- количество неуспешных соединений по видам:
- отсутствие или неправильные параметры акустических зуммерных или вызывных сигналов;
- ошибочный выбор направления;
- несостоявшееся или преждевременное разъединение;
- повышенный уровень шумов;
- чрезмерные задержки.

Таким образом, на основании проведенных контрольных вызовов формируются и передаются в управляющий компьютер следующие группы параметров качества услуги предоставления телефонной связи.

- Параметры доступности связи.
- Параметры непрерывности связи.

- Параметры качества передачи информации пользователя.
- Параметры, характеризующие временные задержки, возникающие при установлении соединения от абонента до абонента.

В ходе измерений мобильная лаборатория совершает объезд исследуемой территории (например, зоны покрытия какой-либо БС). После обработки результатов мобильных измерений с помощью специального ПО сотрудники отдела планирования могут наметить дальнейшие пути развития и оптимизации сети мобильной связи [11].

Используя систему GPS и специальное программное обеспечение, можно построить на цифровой карте пройденный мобильной лабораторией маршрут с отметками уровней принятого сигнала.

В действующих мобильных сетях контролируются несколько основных параметров, по которым оценивают работоспособность и устанавливают причины отказов.

Измерения параметров действующей сети мобильной связи или отдельных БС проводятся с использованием мобильных измерительных комплексов, в состав которых обычно входят:

- компьютер со специальным программным обеспечением (диагностическим монитором);
- измерительный приемник;
- система GPS;
- абонентский радиотелефон.

Данные с абонентского радиотелефона и/или измерительного приемника поступают на диагностический монитор, где они обрабатываются, запоминаются и отображаются на экране в виде численных значений, таблиц или графиков. В качестве дополнительного оборудования может быть установлен анализатор спектра (например, для оценки электромагнитной совместимости).

## **1.7. Разработка математических основ современных методов оценки качества передачи речевой информации по каналам мобильной связи**

### **1.7.1. Особенности контроля качества передачи речи**

Речь, являясь одной из самых ярких характеристик индивидуума, содержит в себе не только смысловую, но и эстетическую информацию. Поэтому желательно изыскание таких критериев и методов оценки качества телефонной передачи, с помощью которых можно было бы оценить не только степень передачи смысла речи, но и степень передачи особенностей голоса говорящего и динамики речи.

Все факторы, характеризующие качество передачи речи (разборчивость, громкость, естественность и мешающее влияние различных помех), определяются не только физическими характеристиками телефонного тракта и физиологическими свойствами участвующих в процессе приема-передачи слухового и речевого аппаратов человека, но и рядом субъективных и чисто психологических факторов.

Из вышесказанного следует, что оценка качества телефонной передачи по своей природе субъективна.

Абонентская оценка качества передачи – весьма сложная проблема. Естественно, что при оценке качества телефонной передачи абонент подсознательно учитывает действие всех или, по крайней мере, большинство факторов, определяющих качество передачи. Иными словами, оценка качества телефонной передачи абонентами является своего рода «интегральной» оценкой, учитывающей разборчивость, громкость, естественность звучания голоса собеседника и другие возможные факторы.

Все факторы, определяющие качество передачи и их удельный вес в «интегральной» абонентской оценке, связаны с психикой абонента, состоянием его нервной системы, необходимой торопливостью или, наоборот, со спокойствием, которое абонент испытывает, осуществляя нужное ему соединение. Восприятие меняется в зависимости от возраста

слушателя и особенностей его родного языка. Более того, от теста к тесту мнения одних и тех же людей могут изменяться, многое зависит от ожиданий: хорошие оценки сотовой связи чаще всего объясняются ожиданием невысокого качества.

В этой связи можно сказать, что оценка качества телефонной передачи есть продукт мышления и состояния психики абонента, а не простое техническое измерение [3]. То есть, оценка качества телефонной передачи есть не что иное, как психологическая реакция абонента на телефонную передачу. Большое число не поддающихся точному учету факторов, оказывающих влияние на абонентскую оценку качества передачи, в сильной степени усложняет ее выражение мерой и числом. Учитывая различные вкусы и потребности, а также зависимость суждений абонентов о качестве передачи от их психического состояния, можно говорить лишь о какой-то усредненной абонентской оценке качества телефонной передачи. Достаточная точность такой оценки, очевидно, может быть обеспечена только статистическими методами. Ниже мы рассмотрим некоторые из них – метод парных сравнений и метод мнений.

В последнее время наиболее часто используются объективные методы оценки, дающие возможность автоматизировать данный процесс, сделать его экономичнее и технологичнее и, что самое важное, осуществлять оценку качества без перерыва связи [11]. Объективные измерения эффективны с точки зрения цены и повторяемости результатов, однако при этом важно правильно выбрать способ оценки. Ниже мы рассмотрим особенности объективной оценки качества передачи речи по каналам при мобильной связи и более детально остановимся на объективных методах контроля качества передачи по критериям громкости, разборчивости и натуральности.

При планировании современных сетей с точки зрения обеспечения достаточного качества передаваемой речи МСЭ-Т рекомендует основываться на специально разработанной E-модели [11, 22] (рекомендация G.107). Основной принцип, заложенный в E-модель, гласит: «Психологические

факторы на психологической шкале являются аддитивными». Таким образом, E-модель учитывает все факторы, влияющие на качество речевого обмена в телефонных сетях, основными из которых являются уровень речевого сигнала, амплитудно-частотные искажения, задержка передачи, задержка и ослабление эхо-сигнала, уровень шума и нелинейные искажения. Модель вводит такой параметр, как рейтинг (качества) передачи (transmission ratings – R). Основное уравнение данной модели выглядит следующим образом:

$$R = R_0 - I_s - I_d - I_e + A \quad (1.9)$$

где:

$R_0$  – отношение сигнал/шум;

$I_s$  – степень ухудшения тракта, связанная с искажениями типа перегрузки, шумом квантования, и др. ;

$I_d$  – ухудшение тракта, связанное с задержкой распространения радиосигнала;

$I_e$  – снижение качества речи, связанное с включенными в тракт устройствами обработки речи (может варьироваться в достаточно значительных пределах, в зависимости от типа кодека);

$A$  – коэффициент ожидания, определяемый эмоциональным настроением пользователя, который подсознательно предъявляет к качеству связи разные требования в зависимости от условий ведения разговора и его доступности.

При комфортных условиях и со стационарного телефона ожидаемое пользователем качество связи очень высокое, т.е.  $A = 0$ . При разговоре из быстро движущегося транспорта или с абонентом, который находится где-нибудь в малодоступном районе, пользователь заранее настроен не обращать внимания на плохое качество, и значение  $A$  может равняться 20.



Таблица. 1.9. Степень удовлетворенности пользователей качеством связи в зависимости от показателей R и MOS.

Значение (нижний предел)	R	MOS	Удовлетворенность пользователей
90		4,34	Весьма удовлетворены
80		4,03	Удовлетворены
70		3,60	Некоторые пользователи не удовлетворены
60		3,10	Многие пользователи не удовлетворены
50		2,58	Почти все пользователи не удовлетворены

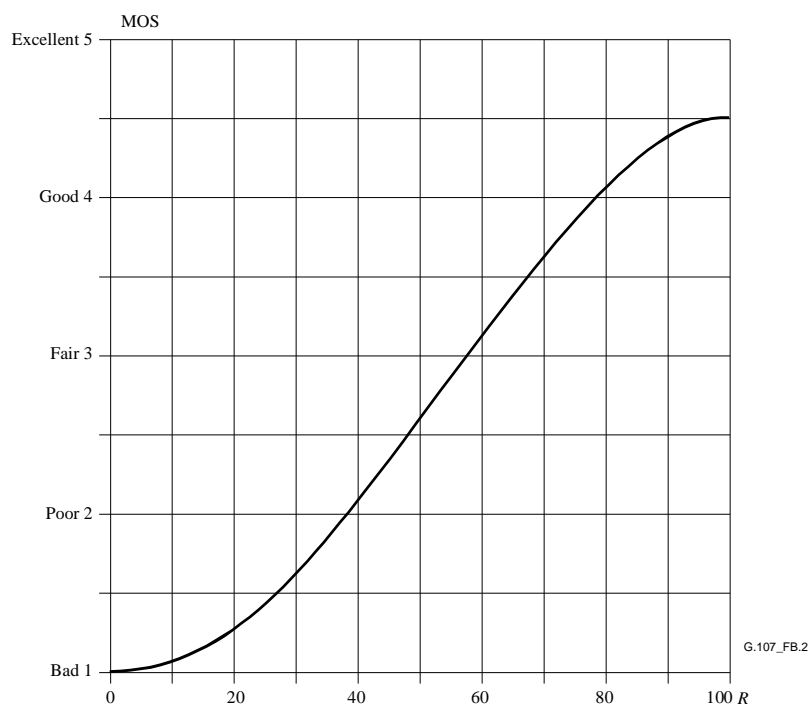


Рис.1.6. Связь между значениями MOS и R.

Данная модель может быть полезна при проектировании сетей связи, для того, чтобы убедиться, что будущие (потенциальные) абоненты будут удовлетворены качеством передачи речи в создаваемой сети.

### **1.7.2. Субъективные методы контроля качества передачи**

Традиционно качество передачи речи определяется на основании субъективных оценок группы людей, работающих в стерильных условиях тестовой среды. Данный метод занимает много времени и требует наличия большого числа участников, поскольку разные люди могут совершенно по-разному оценивать качество, обеспечиваемое одной и той же системой.

В середине 90-х годов Сектор по стандартизации телекоммуникаций Международного союза электросвязи (МСЭ-Т) завершил разработку рекомендации Р.800, “Методы субъективной оценки качества речевой связи” [16], которая на сегодня является наиболее признанной методологией оценки работы систем передачи речи. В ней описываются условия проведения тестовых испытаний, содержание аудиообразцов, система оценок и методики анализа полученных данных. Чаще всего метод Р.800 используют для расчета средней субъективной оценки (Mean Opinion Score — MOS) качества речи по пятибалльной шкале. В нашей стране субъективные методы контроля качества передачи речи описываются в ГОСТ 51061-97 «Системы низкоскоростной передачи речи по цифровым каналам. Параметры качества речи и методы измерений» [26].

Поскольку тесты рекомендации Р.800 могут приводить к получению неоднозначных результатов, среди ученых и инженеров нет согласия относительно их применения. Даже сами авторы этой рекомендации предупреждают о некорректности сравнения оценок MOS, полученных в разных условиях. К тому же лексика, рекомендуемая в Р.800, дает повод для субъективной интерпретации. Исследователи просят участников оценить качество телефонной связи в терминах: “отлично”, “хорошо”, “удовлетворительно”, “неудовлетворительно” и “плохо” (см. табл.1.2).

Проблема состоит в том, что разница между “неудовлетворительным” (“poor”) и “плохим” (“bad”) качеством, как правило, намного меньше, чем между “удовлетворительным” (“fair”) и “неудовлетворительным”, поэтому данную шкалу оценок нельзя считать равномерной. С изменением лексики изменятся и результаты. Они могут зависеть от национальности участников тестов. Исследования показали, что если итальянцы, оценивая звонок положительно, ставят оценку “хорошо”, то американцы — “удовлетворительно”.

Однако, несмотря на эти проблемы, субъективная оценка качества передачи речи по каналам связи широко применяется.

### **Измерение разборчивости методом артикуляции**

Измерение разборчивости методом артикуляции производится бригадой операторов путем передачи и приема по испытуемому тракту серии артикуляционных таблиц, составленных из элементов речи (слогов, слов, фраз) – см. приложение 4.

Получаемые в результате таких измерений значения разборчивости являются оценкой качества испытуемого тракта. Эта оценка характеризует телефонный тракт с точки зрения его способности передавать смысловую информацию, содержащуюся в речи собеседников.

Очевидно, что любые отклонения субъективного характера, связанные с субъективными свойствами операторов, которые участвуют в передаче, приеме и последующей проверке принятых артикуляционных таблиц, могут привести к погрешности в оценке испытуемого телефонного тракта. Субъективные факторы, приводящие к погрешности измерений, весьма многообразны, однако важнейшими из них являются [3]:

- дикция и слух операторов;
- их уровень развития;
- образование операторов;
- сообразительность;

- способность концентрировать внимание;
- степень знакомства с текстом и т.д.

Использование в артикуляционных измерениях бригады операторов способствует усреднению их субъективных свойств и уже одним этим до некоторой степени ослабляет влияние субъективных факторов.

Люди, отобранные для работы в артикуляционной бригаде, не должны иметь дефектов речи и слуха, должны обладать быстротой реакции и способностью концентрировать внимание. Нормально укомплектованная бригада должна состоять из пяти операторов (трех мужчин и двух женщин или наоборот).

Такой метод определения качества передачи речи по каналу связи сопряжен с некоторыми трудностями, указанными ниже.

### **1. Квалифицированность специалистов**

Неквалифицированные эксперты (по сравнению с квалифицированными) занижают оценку качества при объективно высоком качестве передачи и, наоборот, завышают оценку при объективно низком качестве. Эти результаты подтверждают, что для оценки качества вновь разрабатываемых высококачественных систем передачи надо привлекать высококвалифицированных специалистов. Причем молодые слушатели без дефектов слуха, имеющие опыт в проведении экспертиз дают оценки, практически неотличимые от показаний квалифицированных экспертов. Поэтому экспертные группы с таким составом часто используют, особенно на предварительной оценке качества.

### **2. Подбор тестовых программ**

Вопрос о правильном выборе тестовых фрагментов программ (артикуляционных таблиц) для проведения экспертиз качества весьма важен. Обычно известен характер искажений, возникающих в системе передачи при обработке того или иного входного сигнала, и характер маскировки для разных входных сигналов, поэтому отбор тестовых сигналов производят не вслепую. Оценка зависит от ряда факторов, основанных на выборе для

прослушивания элементов речи (звуки, слоги, слова, фразы), наиболее полно отражающих статистику языка.

При проведении таких испытаний специально подобранные дикторы (с хорошей дикцией, правильной речью, с хорошим слухом) зачитывают в определенном ритме стандартизованные слоговые таблицы в выбранном помещении. Важное значение имеет качество голоса диктора, его дикция, интонация.

### **3. Выбор помещения прослушивания**

Точно воспроизводимые условия прослушивания практически можно создать лишь в специальных заглушенных камерах, в которых формируется свободное или диффузное звуковое поле. Такие условия сильно отличаются от условий, при которых пользуются мобильной связью. Но звуковые поля в жилом помещении, на улице, в производственном помещении и т.п., весьма разнообразны, непостоянны, их трудно воспроизводить. При проведении экспертиз качества обычно идут на компромисс. В качестве помещения прослушивания используют заглушенную комнату, обеспечивающую достаточную звукоизоляцию от внешних акустических факторов. Максимальное звуковое давление в местах размещения экспертов составляет 75... 85 дБ, причем для разных экспертов оно не должно отличаться более чем на  $\pm 4$  дБ. Уровень шумов в помещении не должен превышать 30 дБ, он обычно измеряется с использованием специального взвешивающего контура. Этот уровень шума, как правило, ниже уровня шума в жилом помещении. Однако эффективной маскировки искажений шумами помещения прослушивания не происходит, так как спектр акустических шумов помещения сосредоточен в области весьма низких звуковых частот, в то время как спектр искажений цифровой системы передачи близок к спектру белого шума.

#### **Метод мнений**

Метод заданных категорий оценки, или, как его еще называют, метод многобальной оценки, нашёл наибольшее применение, поскольку он

относительно прост. Типичным представителем метода заданных категорий оценки является так называемый метод мнений.

Сущность метода заключается в следующем: подлежащий оценке тракт телефонной передачи поочередно предоставляется не менее чем 12 парам обычных телефонных абонентов, которые ведут активный двусторонний разговор в течение примерно 3-5 минут. Тема для разговора может быть, вообще говоря, произвольной, однако в целях облегчения нахождения темы для разговора предлагается использовать специальные таблицы случайных фигур.

Для построения фигур [3] изготавливается сетка из пяти концентрических окружностей, которым придается двузначная нумерация: 1-2, 3-4, 5-6, 7-8, 9-10. Нумерация окружностей начинается от центра. Окружности делятся на равные части с помощью восьми радиусов, которые нумеруются по часовой стрелке порядковыми числами от 1 до 8 (рис.1.7).

Такая сетка является шаблоном для составления рисунков фигур. Кроме шаблона используется также таблица двузначных случайных чисел. Происходит построение фигуры следующим образом: из таблицы случайных чисел отбираем восемь таких двузначных чисел, первые цифры которых не повторяются и имеют значения от 1 до 8. Вторые цифры этих чисел могут быть любыми. Пусть отобранные числа имеют значения: 43, 17, 26, 70, 63, 34, 87, 52.

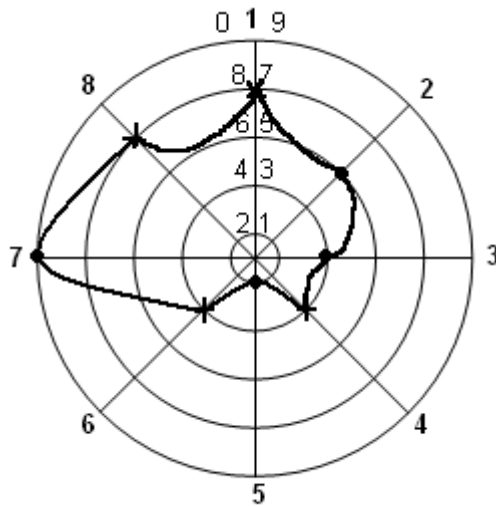


Рис.1.7. Пример построения фигуры по шаблону.

Первые цифры каждого числа соответствуют номерам радиусов, а вторые – номерам окружностей. Тогда каждое число определяет точку пересечения радиуса с окружностью. Так, число 43 даст точку пересечения радиуса 4 с окружностью 3-4, число 17 – точку пересечения радиуса 1 с окружностью 7-8 и т.д. Эти точки пересечения отмечаются кружком, если соответствующее число четное, или крестиком, если соответствующее число нечетное. В целях многократного использования одного и того же шаблона построение ведут на кальке, накладываемой на шаблон.

Полученные по всем восьми числам точки соединяют между собой линией, соблюдая следующее условно принятое правило: через точки, отмеченные кружочком, проводят плавную кривую; в точках, отмеченных крестиком, кривая претерпевает разрыв (рис.1.7). Аналогичным образом может быть построено необходимое число фигур, причем для каждой новой фигуры должны использоваться новые комбинации случайных чисел.

Полученные фигуры путем случайного отбора включаются в так называемые «листы отвечающего», причем в каждый такой лист включается 12 фигур. В свою очередь, каждая из 12 фигур получает условное словесное обозначение. Слова для обозначений берутся из какого-либо печатного

текста (например, из газетной статьи) подряд, исключая собственные имена, союзы, предлоги, междометия.

Любые три фигуры из «листа отвечающего» наносятся на «лист вызывающего». Там же помещается колонка слов, обозначающих все 12 фигур «листа отвечающего». Каждая пара таких листов получает один и тот же номер. Фрагмент «листа отвечающего» приведен на Рис. 1.8.



Рис. 1.8. Фрагмент «листа отвечающего».

Практически для использования метода мнений достаточно иметь комплект из 25-30 «листов отвечающего» и «листов вызывающего».

К оценке испытуемых трактов телефонной передачи по методу мнений должны привлекаться лица (мужчины и женщины) из числа обычных телефонных абонентов, не заинтересованные в результатах измерений и не являющиеся специалистами в вопросах измерения и оценки качества передачи речи. Также они не должны участвовать в подобных испытаниях чаще, чем раз в полгода [16].

Передающий и приемный концы испытуемого тракта должны располагаться в двух звукоизолированных друг от друга помещениях, исключающих прямое прослушивание «по воздуху». В помещениях передачи и приема должны быть созданы акустические условия в соответствии с требованиями к испытуемой системе.

В процессе испытаний пара операторов – вызывающий и отвечающий – получает от руководителя опытов соответствующие листы одного и того же



номера с фигурами. Вызывающий оператор, начиная разговор, описывает своими словами первую из трех фигур, расположенных на его листе. Отвечающий оператор, перебивая вызывающего и задавая ему уточняющие вопросы, пытается опознать описываемую фигуру на своем листе. Опознав фигуру, отвечающий сообщает вызывающему ее словесное обозначение, после чего вызывающий, убедившись, что такое слово имеется в таблице слов на его листе, приступает к описанию второй, а затем и третьей фигур. Весь процесс такого разговора длится 3-5 минут, после чего оба оператора, не обмениваясь друг с другом мнением о качестве передачи, совершенно самостоятельно выставляют словесную оценку разговора в соответствии с Таблицей 1.2.

Процесс измерений считается законченным, когда все пары операторов произведут оценку качества разговора по описанной выше методике. По окончании измерений осуществляется обработка полученных данных, в результате чего определяется оценка качества передачи испытуемой телефонной системы.

Преимущества метода мнений заключаются в следующем:

1. Оценка качества передачи по методу мнений производится абонентами по степени напряженности их внимания, необходимого для ведения телефонного разговора. Очевидно, что степень напряженности внимания зависит от многих факторов, в том числе и от громкости, разборчивости, естественности звучания голоса говорящего и мешающего действия различных помех. Следовательно, оценка по методу мнений принадлежит к так называемой «интегральной» оценке.
2. Положение микротелефонной трубки в пространстве, а также расстояние ото рта говорящего до микрофона устанавливается произвольно самими операторами, как и при обычном телефонном разговоре.
3. Используемый для измерений речевой материал максимально приближается к обычному телефонному разговору.

4. Оценка производится обычными абонентами, а не специально подобранной и тренированной бригадой операторов.
5. Относительная простота постановки экспериментов и обработки результатов измерений.

Недостатки метода мнений заключаются в следующем:

1. При оценке качества передачи по этому методу абонент находится в весьма сложных психологических условиях, не свойственных условиям ведения обычного телефонного разговора. Так, в процессе ведения разговора он должен определить степень напряженности своего внимания и найти на заданной шкале оценок такую категорию, которая лучше других согласуется с его ощущениями.
2. Степень напряженности внимания – это очень сложный с психологической точки зрения критерий, который сложно определить.
3. Большой разброс оценок, так как категории определены недостаточно конкретно.
4. Повышенные требования к наблюдателям в отношении их общего уровня развития.
5. Трудность установления границ категорий, что требует от наблюдателей повышенного внимания.
6. Несоответствие оценок, данных в одних условиях, оценкам, полученным в других условиях.
7. Возникает погрешность «усреднения» - наблюдатели избегают применения крайних оценок.
8. Возникает погрешность «снисходительности». Наблюдатель дает завышенные – положительная «снисходительность» - или заниженные - отрицательная «снисходительность» - оценки. Положительная «снисходительность» является, как правило, следствием привычности к данному возбудителю, отрицательная – следствием знания склонности к завышению оценок.

## **Метод парных сравнений**

Метод парных сравнений состоит в том, что наблюдателю предлагается путем сравнения двух возбудителей друг с другом высказать суждение (больше – меньше, лучше – хуже). Величины реакций на соответствующие возбудители вычисляются путем статистической обработки числа высказанных суждений в пользу того или иного возбудителя. В отличие от первого метода здесь значительно облегчается задача наблюдателей, так как от них требуется определить только различие в величинах реакций, не связывая это различие с категориями оценок. Данное обстоятельство приводит к устранению многих недостатков метода мнений.

В случае оценки качества телефонной передачи возбудителем, очевидно, будет являться воспринимаемая абонентами речь.

Системы телефонной связи, подлежащие оценке по методу парных сравнений, комбинируются во всевозможные пары, причем передача речи по любой паре систем может рассматриваться как парное возбуждение, а реакция абонентов на такое парное возбуждение – как мера оценки качества передачи.

Качество передачи речи испытуемого тракта оценивают путем сравнения с эталонным трактом. Качество речи оценивают по следующим контрольным фразам, приведенным в ГОСТ Р 51061-97.

### **I. Основные фразы.**

1. Если хочешь быть здоров, советует Татьяна Илье, чисть зубы пастой «Жемчуг»!

2. Вчера на Московском заводе малолитражных автомобилей состоялось собрание молодежи.

3. В клумбах сочинской здравницы «Пуща», сообщает нам автоинспектор, обожгли шихту.

4. Тропический какаду - это крупный попугай? Ты не злословишь?

5. Актеры и актрисы драматического театра часто покупают в этой аптеке антибиотики.

6. Нам с вами сидеть и обсуждать эти слухи некогда!
7. Так ты считаешь, что техникой мы обеспечены на весь сезон?

Примечание: Подчеркнуты слова, на которые делается фразовое ударение. Фразы 6, 7 произносятся без пауз между словами.

## II. Дополнительные фразы

1. Раз. Эти жирные сазаны ушли под палубу.
2. Алло, слушаю! Кто у телефона? Ах, это Вы! Я был вчера у Вас.

Бригада аудиторов должна состоять из 10-12 человек. Аудиторами не могут быть специалисты по кодекам речи. Число дикторов должно быть не менее 5 (мужчины и женщины).

Каждую контрольную фразу диктор произносит два раза - один раз через оцениваемый тракт, другой - через эталонный тракт. Порядок чередования трактов - случайный. Контрольные фразы, произносимые диктором, могут быть записаны на магнитофон, а затем прослушаны аудиторами в записи. Пауза между фразами 2-3 с., пауза между парами фраз 4-5 с. (Рис.1.9)

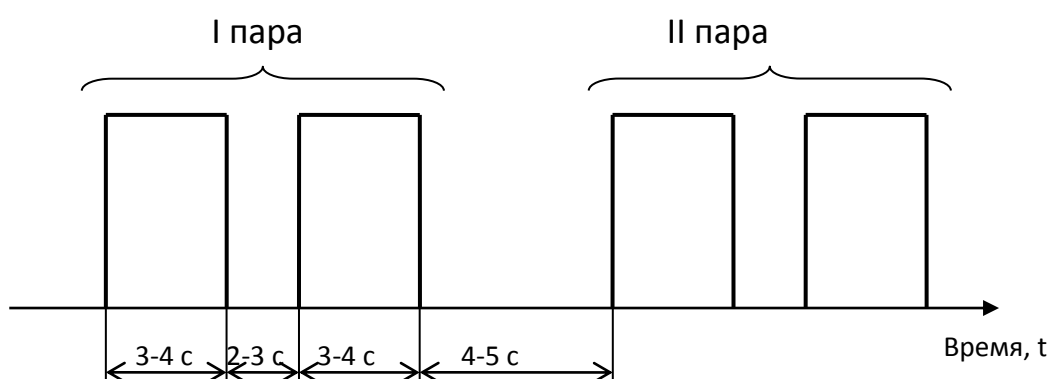


Рис.1.9. Схема предъявления парных возбудителей.

Парные возбуждения подаются в случайном порядке как в прямом, так и в обратном направлениях. Такой способ передачи обусловлен тем, что число суждений, высказанных в пользу той или иной системы, во многом определяется порядком следования систем в данной паре.

Экспериментально было установлено, что система, следующая второй в паре, получает больше положительных суждений, чем в случае, когда она является первой, причем разница в числе положительных суждений тем больше, чем меньше объективная разница между системами, включенными в пару. Изменение порядка следования систем в каждой паре создает условия взаимной компенсации этой погрешности.

Возможны два варианта оценки качества речи, либо по критерию «лучше - хуже», либо в баллах по пятибалльной шкале. В первом случае при прослушивании аудитор в бланке, образец которого приведен в приложении 5, ставит знак «+» в графе 1 или 2 в зависимости от того, какая фраза по его мнению звучит лучше. В том случае, если аудитор не может отдать предпочтение какому-либо варианту, он оставляет обе графы незаполненными. При подсчете числа предпочтений в случае незаполненных граф обоим вариантам засчитывается по 0,5.

Результат испытаний оценивают средним числом предпочтений, вычисляемым по формуле

$$P = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_i, \text{ где} \quad (1.7)$$

$p_i$  - число случаев предпочтений первой (второй) фразы;

$N$  - число единичных измерений.

Далее вычисляют разницу чисел предпочтений по формуле

$$\Delta p = \frac{|p_1 - p_2|}{p_1 + p_2} \cdot 100\%, \quad (1.8)$$

где:

$p_1$  - среднее число предпочтений первой фразы;

$p_2$  - среднее число предпочтений второй фразы.

При разнице чисел предпочтения менее 15 % тракты считают одинаковыми, т. е. оцениваемый тракт передает речь с тем же качеством, что и стандартный (эталонный) телефонный тракт, и по показателю качества речи, измеренного по методу парных сравнений, пригоден для использования в телефонной сети.

При  $\Delta p$  менее или равным 75 % испытуемый канал вносит искажения, заметные только при парных сравнениях испытательных фраз и незаметные при реальном телефонном обмене. Такой канал по показателю качества речи, измеренного по методу парных сравнений, пригоден для использования в телефонной сети.

Критерий «лучше - хуже» неприменим в случаях, когда и передаваемой по оцениваемому каналу передачи речи имеются искажения, хотя и не мешающие ее восприятию, но легко различимые сравнительно с обычным телефонным трактом, и обеспечивающие обычному телефонному тракту 100 % предпочтения. В этом случае качество речи по методу парных сравнений необходимо оценивать в баллах.

При оценке трактов в баллах аудитор, прослушав одну и ту же фразу, прошедшую через сравниваемые тракты, выставляет в графах 1 и 2 оценки в баллах с точностью до 0,1, соответствующие по его мнению качеству того и другого тракта, руководствуясь таблицей 1.10 и имея в виду, что качество речи, передаваемой через стандартный канал, принято оценивать в 4 балла.

Таблица 1.10. Соответствие между качеством речи и оценкой в баллах.

<b>Характеристика качества речи</b>	<b>Баллы</b>
Естественность звучания речи. Высокая узнаваемость. Полное отсутствие помех и искажений	4,6-5,0
Естественность звучания речи. Высокая узнаваемость. Отдельные малозаметные искажения или помехи	4,0-4,5
Естественность звучания речи. Высокая узнаваемость. Слабое постоянное присутствие отдельных видов искажений или помех	3,5-3,9
Незначительное нарушение естественности и узнаваемости. Заметное присутствие отдельных искажений или помех	3,0-3,4
Заметное нарушение естественности и ухудшение узнаваемости, присутствие нескольких видов искажений (картавость, гнусавость и др.) или помех	2,5-2,9
Существенное искажение естественности и ухудшение узнаваемости. Постоянное присутствие искажений типа картавость, гнусавость и др. или помех	1,7-2,4
Сильные искажения типа картавость, гнусавость и др. Механический голос. Наблюдается потеря естественности и узнаваемости	<1,7

При оценке результата измерений в баллах средний балл вычисляют по формуле:

$$X = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \quad (1.9)$$

где:

$x_i$  - результат единичного измерения;

$N$  - число единичных измерений.

### **1.8. Численная оценка качества передачи информации по мобильным каналам связи при объективных методах контроля**

Человеческая речь и её формирование представляет собой сложную систему, речь считается процессом случайным и нестационарным, поэтому оценивать ее одним критерием признано недостаточным. Для более детальной оценки процесса контроля качества передачи речи целесообразно использовать либо систему критериев, либо обобщенный критерий (интегральный). Если источник речевой информации полностью отвечает нормативным критериям, то качество передачи по каналу зависит от состояния системы в целом.

Однако, выбор критерия количественной оценки качества передачи речи, несмотря на многолетний опыт экспериментальных и теоретических исследований отечественных и зарубежных ученых, остается до сих пор предметом споров. Считается, что критерий должен:

- отражать назначение испытываемой системы передачи речи;
- выражаться через все параметры испытываемой системы;
- допускать возможность достаточно точного его вычисления;
- быть верным при любых значениях параметров системы;
- быть независимым от испытываемой системы.

Основными показателями, характеризующими качество передачи речи по каналам связи, являются: громкость, разборчивость речи, натуральность звучания голоса. Интегральный критерий оценки качества передачи может состоять из следующих компонент [30, 31, 34]:



$$K_{\text{интегр.}} = f(K_{\text{гр.}}, K_{\text{разб.}}, K_{\text{нат.}})$$

где:

$K_{\text{гр.}}$  - оценка качества передачи по громкости;

$K_{\text{разб.}}$  - оценка качества передачи по разборчивости;

$K_{\text{нат.}}$  - оценка качества передачи по натуральности звучания голоса.

Главное достоинство интегрального критерия оценки заключается в том, что в нём должны содержаться все основные показатели, характеризующие качество передачи речи по каналам связи. По-другому, с помощью интегрального критерия качество передачи оценивается более точно и близко к реальному.

Определение функции  $K_{\text{интегр.}} = f(K_{\text{гр.}}, K_{\text{разб.}}, K_{\text{нат.}})$  является выбором интегрального критерия оценки качества передачи речи. Точность измерений качества зависит от правильного выбора интегрального критерия. Ниже мы рассмотрим различные методы определения интегральной оценки  $K_{\text{интегр.}}$ .

Как мы уже упоминали выше, при оценке качества передачи информации по мобильным каналам связи необходимо ввести какую-то количественную величину коэффициента оценки. За основу может быть принят обобщённый коэффициент качества  $K_{\text{обобщ. кач.}}$ , используемый при оценке показателя качества передачи речевого сигнала по проводным и составным каналам связи [6]. В данном подпункте мы рассмотрим возможные численные методы интегральной оценки качества передачи речевой информации, передаваемой по каналам мобильной связи.

### **Арифметический метод определения интегрального критерия**

сводится к оптимизации многокомпонентной функции оценки качества.

Рассмотрим обобщенный коэффициент качества, определяемый по формуле:

$$K_{\text{обобщ. кач.}} = \mu_1 K_{\text{гр.}} + \mu_2 K_{\text{разб.}} + \mu_3 K_{\text{нат.}}, \quad (1.10)$$

где:

$K_{гр}$  – коэффициент оценки качества передачи речевой информации по громкости;

$K_{разб}$  – коэффициент оценки качества передачи речевой информации по разборчивости;

$K_{нат}$  – коэффициент оценки качества передачи речевой информации по натуральности;

$\mu_1$  – весовой коэффициент оценки качества передачи речевой информации по громкости;

$\mu_2$  – весовой коэффициент оценки качества передачи речевой информации по разборчивости;

$\mu_3$  – весовой коэффициент оценки качества передачи речевой информации по натуральности.

При мобильной связи все три составляющие  $K_{гр}$ ,  $K_{разб}$  и  $K_{нат}$  функционально зависят от структуры канала, т.е. от  $K_{стр.кан}$ . Таким образом, возникает задача численного представления коэффициента структуры канала. В каждом мобильном телефоне на световом табло структура канала высвечивается в виде гистограммы из пяти столбцов различных уровней. Самый низкий уровень соответствует каналу наибольшей протяженности, самый высокий – каналу наименьшей протяженности. Это позволяет ввести пятибалльную систему оценки структуры канала связи [6].

Существует два возможных способа введения этого коэффициента в формулу 2.5.

1. Введение коэффициента структуры канала в виде отдельной составляющей с соответствующим весовым коэффициентом  $\mu_4$ .

$$K_{обобщ.кач.} = \mu_1 K_{гр} + \mu_2 K_{разб} + \mu_3 K_{нат} + \mu_4 K_{стр.кан}, \quad (1.11)$$

где:

$\mu_1 = 0,2$ ;  $\mu_2 = 0,4$ ;  $\mu_3 = 0,2$ ;  $\mu_4 = 0,2$  – весовые коэффициенты, найденные методом экспертных оценок.

2. Ввод функциональной зависимости от коэффициента структуры канала в каждую из составляющих  $K_{гр}$ ,  $K_{разб}$  и  $K_{нат}$ .

$$K_{обобщ.кач.} = \mu_1 \frac{K_{гр} + K_{стр.кан}}{2} + \mu_2 \frac{K_{разб} + K_{стр.кан}}{2} + \mu_3 \frac{K_{нат} + K_{стр.кан}}{2}, \text{ где} \quad (1.12)$$

$\mu_1 = 0,25$ ;  $\mu_2 = 0,5$ ;  $\mu_3 = 0,25$  – весовые коэффициенты, найденные методом экспертных оценок.

К достоинствам арифметического метода нужно отнести то, что он учитывает удельный вес каждого индивидуального критерия оценки (разборчивости, натуральности, громкости, структуры мобильного канала связи). Для определения возможности использования данного метода оценки качества передачи речевой информации по каналам связи рассмотрим взаимосвязь между индивидуальными компонентами и интегральным критерием.

Практика показывает, что, когда одна из составляющих интегрального критерия равна нулю, интегральный критерий тоже должен быть равен нулю. То есть очевидно, что при нулевой громкости, или разборчивости, или натуральности звукового сигнала и обобщенный коэффициент качества будет нулевым. Но формулы 2.6 и 2.7 никак этого не отражают.

Для устранения основного недостатка арифметического метода их необходимо скорректировать. Тогда выражения 2.6 и 2.7 примут вид 2.8 и 2.9 соответственно.

$$K_{обобщ.кач.} = M \cdot (\mu_1 K_{гр} + \mu_2 K_{разб} + \mu_3 K_{нат} + \mu_4 K_{стр.кан}), \quad (1.13)$$

где:

$M = 1$ , если  $K_{гр}$ ,  $K_{разб}$ ,  $K_{нат}$  и  $K_{стр.кан}$  не равны нулю;

$M = 0$ , если хотя бы один из указанных коэффициентов равен нулю.

$$K_{\text{обобщ.кач.}} = M \cdot \left( \mu_1 \frac{K_{\text{зр}} + K_{\text{стр.кан}}}{2} + \mu_2 \frac{K_{\text{разб}} + K_{\text{стр.кан}}}{2} + \mu_3 \frac{K_{\text{нат}} + K_{\text{стр.кан}}}{2} \right), \text{ где} \quad (1.14)$$

коэффициент  $M$  принимает такие же значения, что и в 2.8.

### **Геометрический метод определения интегрального критерия**

Основное достоинство геометрического метода определения интегрального критерия заключается в том, что, когда любая из составляющих компонент равна нулю, то  $K_{\text{интегр.геом.}}$  тоже равен нулю, и достигает максимума только тогда, когда все компоненты достигают максимума.

При геометрическом методе определения интегрального критерия возможны три варианта: оптимистический, пессимистический и реалистический [23].

- Оптимистический критерий оценки качества определяется как максимальное значение, формула которого описывается следующим образом:

$$K_{\text{обобщ.кач. опт.}} = \sqrt[4]{K_{\text{зр. макс}} \times K_{\text{разб. макс}} \times K_{\text{нат. макс}} \times K_{\text{стр.кан. макс}}} \quad (1.15)$$

где:  $K_{\text{обобщ.кач. опт}}$  - интегральная оценка по оптимистическому критерию.

Из формулы следует, что при равенстве любой из составляющих компонент нулю  $K_{\text{обобщ.к кач. опт}}$  тоже равен нулю и достигает максимума только тогда, когда все компоненты достигают максимума. Таким образом, данная формула удовлетворяет требуемому условию.

- Пессимистический критерий оценки качества передачи определяется как минимальное значение. Интегральная оценка равна самому минимальному значению из всех компонент:

$$K_{\text{обобщ.кач. пес.}} = \sqrt[4]{K_{\text{зр. min}} \times K_{\text{разб. min}} \times K_{\text{нат. min}} \times K_{\text{стр. кан. min}}} \quad (1.16)$$

где  $K_{\text{обобщ.кач. пес.}}$  - интегральная оценка качества передачи по пессимистическому критерию.

• Реалистический критерий является комбинированным вариантом оптимистического и пессимистического критерия. Сущность реалистического критерия заключается в том, что интегральная оценка  $K_{\text{обобщ.кач. реал.}}$  равна:

1. одной из составляющих компонент, когда три остальные равны максимуму;
2. геометрической средней величине двух компонент, когда третья и четвёртая равны максимуму;
3. геометрической средней величине трех компонент, когда одна из них достигает максимума;
4. геометрической средней величине всех компонент, когда ни одна из них не достигает максимума.

При определении  $K_{\text{обобщ.кач. реал.}}$  практически применим четвёртый вариант. Тогда выражение для определения реальной величины коэффициента качества примет вид:

$$K_{\text{обобщ.кач. реал.}} = \sqrt[4]{K_{\text{гр. реал.}} \times K_{\text{разб. реал.}} \times K_{\text{нат. реал.}} \times K_{\text{стр. кан. реал.}}} \quad (1.17)$$

Чтобы при геометрическом методе определения интегрального критерия также как и при арифметическом учитывались весовые коэффициенты каждой из его составляющих, в [23] предлагается скорректированное выражение для определения численной величины интегрального критерия независимо от числа составляющих.

$$K_{\text{обобщ.кач. реал.}} = n_i \cdot \sqrt[n_i]{A_1 \times A_2 \times \dots \times A_i}, \quad (1.18)$$

где:  $n_i$  - число составляющих интегрального критерия качества;

$A_i = \mu_i \times K_i$  - произведение весового коэффициента на величину отдельной составляющей интегрального критерия качества.

Можно отметить, что реалистический критерий оценки качества передачи речи действительно является интегральным. Используя этот критерий оценки качества передачи речевой информации, можно считать, что в данном выбранном интегральном критерии содержатся все основные показатели, характеризующие качество передачи речевой информации по каналам связи - оценки по реалистическому критерию действительно правильно характеризуют качество передачи речевой информации в особенных или любых значениях каждого компонента.

Следовательно, выбранный критерий допускает количественную оценку качества передачи речевой информации по каналам мобильной связи.

Для выражения интегральной оценки  $K_{\text{обобщ.кач}}$  в прямых методах обычно используют заранее заданные категории оценки  $I_1, I_2, \dots, I_n$  в виде цифровых или других аналогичных шкал. Рекомендации МСЭ-Т Р800 [16] советуют принять пятибалльную оценку разговора в соответствии с таблицей 2.3.

Таблица 1.11. Оценка разговора в соответствии с рекомендацией МСЭ-Т Р800.

Оценка	Шифр	Число
Отлично	E	4
Хорошо	G	3
Довольно хорошо	F	2
Посредственно	P	1
Плохо	B	0

Отдельные составляющие обобщенного коэффициента качества оцениваются также по пятибалльной системе (от 0 до 4).

## 1.9. Оценка качества передачи по критерию громкости

Первый критерий,  $K_{гр.}$ , - оценка качества передачи речевой информации по громкости – представляет собой пятибалльную оценку от нуля до четырех. Оценивание этого критерия может быть осуществлено путем измерения уровней речевого сигнала и шума и последующего их сопоставления.

Следовательно, оценка критерия по громкости в зависимости от помехозащищенности может быть выражена следующим образом:

$K_{гр.} = 0$  при  $P_{рс} \leq P_{ш}$  (условие помехозащищенности);

$K_{гр.} = 1$  при  $x_1 > P_{рс} > P_{ш}$ ;

$K_{гр.} = 2$  при  $x_2 > P_{рс} \geq x_1$ ; (1.19)

$K_{гр.} = 3$  при  $P_{ср.рс} > P_{рс} \geq x_2$ ;

$K_{гр.} = 4$  при  $P_{max\ рс} > P_{рс} \geq P_{ср.рс}$ ,

где:

$$x_1 = \frac{P_{ср.рс} - P_{min\ рс}}{3} + P_{min\ рс}$$

$$x_2 = \frac{2(P_{ср.рс} - P_{min\ рс})}{3} + P_{min\ рс}$$

В этих формулах:

$P_{ш}$  – уровень шума;

$P_{min\ рс}$  – минимальный уровень речевого сигнала;

$P_{max\ рс}$  – максимальный уровень речевого сигнала;

$P_{ср.рс}$  – средний уровень речевого сигнала,

$P_{рс}$  – контрольный уровень речевого сигнала.

Можно рассчитать значения уровней речевого сигнала  $P_{min\ рс}$ ,  $P_{max\ рс}$  и

$P_{ср.рс}$  по следующим формулам:

$$P_{ср.рс} = 10 \lg (P_{ср.рс} / P_0); \tag{1.20}$$

$$P_{max\ рс} = P_{ср.рс} + A_{пф.рс}; \tag{1.21}$$

$$P_{\min \text{pc}} = P_{\max \text{pc}} - D_{\text{pc}}, \quad (1.22)$$

где:

$$P_0 = 1 \text{ мВт};$$

$P_{\text{ср.рс}}$  – средняя мощность речевого сигнала;

$D_{\text{pc}}$  – динамический диапазон речевого сигнала;

$A_{\text{пф.рс}}$  – пикфактор речевого сигнала.

Из нормативных документов известно, что в канале ТЧ любой системы передачи (аналоговой, цифровой или смешанной) нормативные значения  $D_{\text{pc}}$ ,  $A_{\text{пф.рс}}$ ,  $P_{\text{ср.рс}}$  составляют:  $D_{\text{pc}} = 40 \text{ дБ}$ ;  $A_{\text{пф.рс}} = 14 \text{ дБ}$ ;  $P_{\text{ср.рс}} = 22 \text{ мкВт}$ .

С помощью выражений (2.15-2.17) получаем:

$$P_{\text{ср.рс}} = - 16,6 \text{ дБ};$$

$$P_{\max \text{pc}} = - 2,6 \text{ дБ};$$

$$P_{\min \text{pc}} = - 42,6 \text{ дБ};$$

$$x_1 = - 34 \text{ дБ};$$

$$x_2 = - 25,2 \text{ дБ}.$$

В Таблице 1.12 показана шкала оценок качества передачи речевого сигнала по каналам связи.

Таблица 1.12. Шкала оценок качества передачи речевого сигнала по каналам связи по критерию громкости

К <sub>гр.</sub>	Уровни речевого сигнала (дБ)	
	нижнее ограничение	верхнее ограничение
<b>0</b>	-	$P_{\text{ш}}$
<b>1</b>	$P_{\text{ш}}$	- 34
<b>2</b>	- 34	- 25,2
<b>3</b>	- 25,2	- 16,6
<b>4</b>	- 16,6	- 2,6



### 1.10. Оценка качества передачи по критерию разборчивости

Рассмотрим второй критерий,  $K_{\text{разб}}$ , – оценка качества передачи речевой информации по критерию разборчивости представляет собой пятибалльную оценку 0 - 4.

Разборчивость речи зависит от отношения сигнал/шум (ОСШ). При его малых значениях человеческое ухо воспринимает небольшое число формантных составляющих речи и разборчивость практически равна нулю. При повышении ОСШ ухо начинает воспринимать большее число речевых составляющих, и разборчивость увеличивается до тех пор, пока все форманты не окажутся воспринятыми.

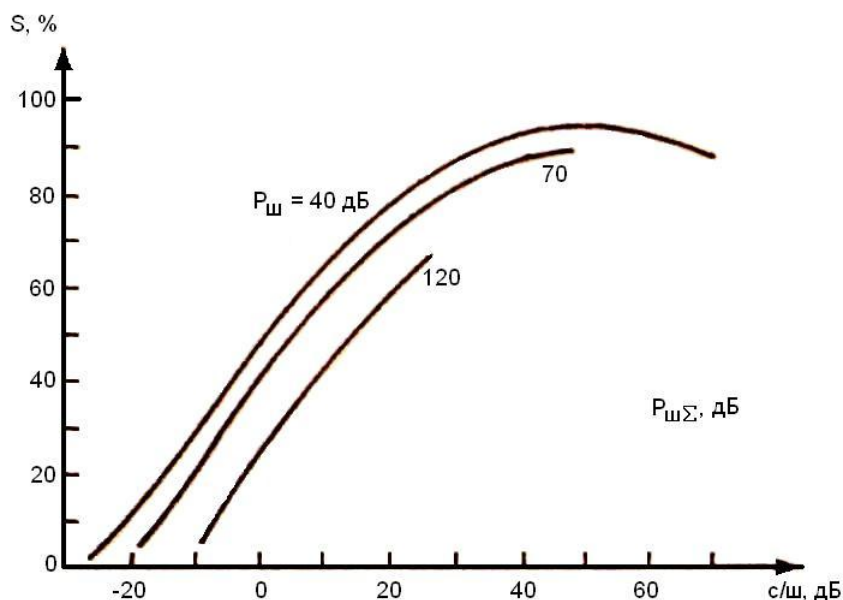
Опытным путём было установлено [24], что отличное качество передачи (при слоговой разборчивости 80 -100%) достигается при отношении сигнал/шум 30 - 40 дБ, тогда как для достижения хорошего качества передачи (при слоговой разборчивости 60 - 80 %) необходимо обеспечить отношение сигнал/шум 20 - 30 дБ (таблица 1.12).

Таблица 1.12. Оценка качества передачи речи по критерию разборчивости.

$K_{\text{разб}}$	Слоговая разборчивость %		Отношение сигнал/шум дБ	
	Нижняя	Верхняя	Нижнее	Верхнее
<b>0</b>	0	20	-	0
<b>1</b>	20	40	0	10
<b>2</b>	40	60	10	20
<b>3</b>	60	80	20	30
<b>4</b>	80	100	30	40

**Момент, когда разборчивость равна 95%, соответствует оптимальной громкости приема. При дальнейшем повышении**

отношения сигнал/шум новые форманты над порогом слышимости не появляются, но зато большее число речевых составляющих начинает приближаться к порогу болевого ощущения. Поэтому разборчивость при повышении определенного отношения сигнал/шум начинает падать (Рис.1.10.).



**Рис.1.10. Зависимость слоговой разборчивости от отношения сигнал/шум.**

На основе совместного спектрального и формантного анализа речи можно считать, что человеческая речь формируется совершенно случайным путем и характеризуется индивидуальной особенностью голоса каждого человека. Однако, в любой речи между слогами, словами и фразами существуют паузы, количество которых в течение нормированного значения времени может быть различным.

Естественно, что в паузах отсутствует мощность передаваемого речевого сигнала ( $P_c$ ), а существует только мощность сигнала помехи ( $P_{ш1}$ ). В случае появления речевого сигнала ( $P_c$ ) одновременно с ним присутствует сигнал помехи мощностью ( $P_{ш2}$ ). На рис 1.11 показана

примерная временная диаграмма речи в течение значения времени  $T$ .

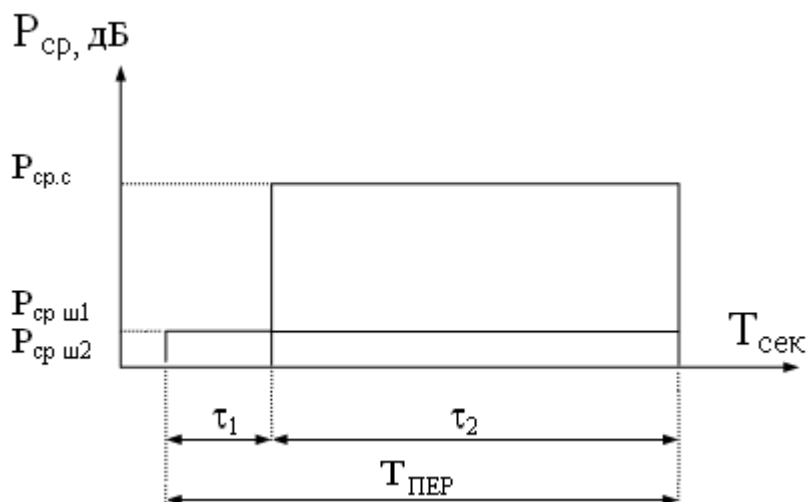


Рис.1.11. Временная диаграмма речи в течение нормированного значения времени  $T$ .

Если принять условие, что  $\tau_1$  – суммарное время попадания пауз,  $\tau_2$  – суммарное время присутствия речи за период времени  $T$ , то есть

$$\tau_1 = \sum_{i=1}^n \tau_{1i} \quad , \quad \text{а} \quad \tau_2 = \sum_{j=1}^m \tau_{2j} \quad (1.23)$$

Из этого следует, что

$$T = \tau_1 + \tau_2 = \sum_{i=1}^n \tau_{1i} + \sum_{j=1}^m \tau_{2j} \quad (1.24)$$

Значения мощностей  $P_{ш1}$ ,  $P_{ш2}$ ,  $P_c$  соответственно равны суммам мощностей  $P_{ш1i}$ ,  $P_{ш2j}$ ,  $P_{cj}$ , то есть

$$P_{ш1} = \sum_{i=1}^n P_{ш1i} \quad (1.25)$$

$$P_{ш2} = \sum_{j=1}^m P_{ш2j} \quad (1.26)$$

$$P_c = \sum_{j=1}^m P_{c_j} \quad (1.27)$$

Тогда отношение сигнал/шум определяется защищенностью, вычисляемой по формуле:

$$A_{\text{защ}} = 10 \lg (P_c / P_{\text{ш2}}), \text{ дБ} \quad (1.28)$$

На практике невозможно измерить значения  $P_c$  и  $P_{\text{ш2}}$ . Измерению подлежат суммарная мощность

$$P_{\Sigma} = P_{\text{ш2}} + P_c \quad (1.29)$$

и мощность шума  $P_{\text{ш1}}$ . Поэтому защищенность следует выразить соответственно через  $P_{\Sigma}$  и  $P_{\text{ш1}}$ .

В [24] показано, что в таком случае защищенность будет вычисляться по формуле:

$$A_{\text{защ}} = 10 \lg \left( \left\{ P_{\Sigma} \frac{T - \tau_2}{\tau_2} - P_{\text{ш1}} \right\} / P_{\text{ш2}} \right), \text{ дБ} \quad (1.30)$$

### 1.11. Оценка качества передачи по критерию натуральности

Третий критерий  $K_{\text{нат}}$  - оценка качества передачи речевой информации по натуральности звучания голоса, как  $K_{\text{гр}}$  и  $K_{\text{разб}}$  оценивается по пятибалльной системе.

**Для определения коэффициента натуральности используется анализ коэффициента взаимной корреляции между огибающими речевого сигнала в формантных частотных полосах [6].**

Формантами являются усиленные области спектра речи. Исключение из передачи любой из этих областей вызывает искажение передаваемого звука, т.е. либо превращение его в другой звук, либо вообще потерю им признаков звука человеческой речи.

Коэффициентом корреляции между огибающими речевого сигнала в формантных полосах является коэффициент корреляции между сигналами на

выходе полосовых фильтров, полосы пропускания которых выбраны соответственно частотному распределению формант.

Результат измерения показывает, что между огибающими имеется статистическая взаимосвязь, характеризуемая коэффициентом взаимной корреляции [30, 32]

$R_{012} = 0,58$  для огибающих первой и второй формантных полос,

$R_{013} = 0,28$  для огибающих первой и третьей формантных полос,

$R_{023} = 0,40$  для огибающих второй и третьей формантных полос.

Допустим, что речевой сигнал подвергается изменению, при этом изменяется и форма формант. Это отражается на слухе человека как потеря натуральности звучания. Соответственно, значения коэффициентов взаимной корреляции между огибающими речевого сигнала тоже меняются. На основе анализа изменения значений коэффициентов корреляции, находим оценку коэффициента натуральности. Здесь задача приведет к выделению формантных областей речевого сигнала и вычислению корреляционной связи между ними.

На Рис.1.12 [6, 30] приведены результаты измерений частотного распределения формант для русской речи. С вероятностью 0,98 частотный диапазон F1 равен 200...850 Гц, F2 – 850...2550 Гц и F3 – 2100...3300 Гц.

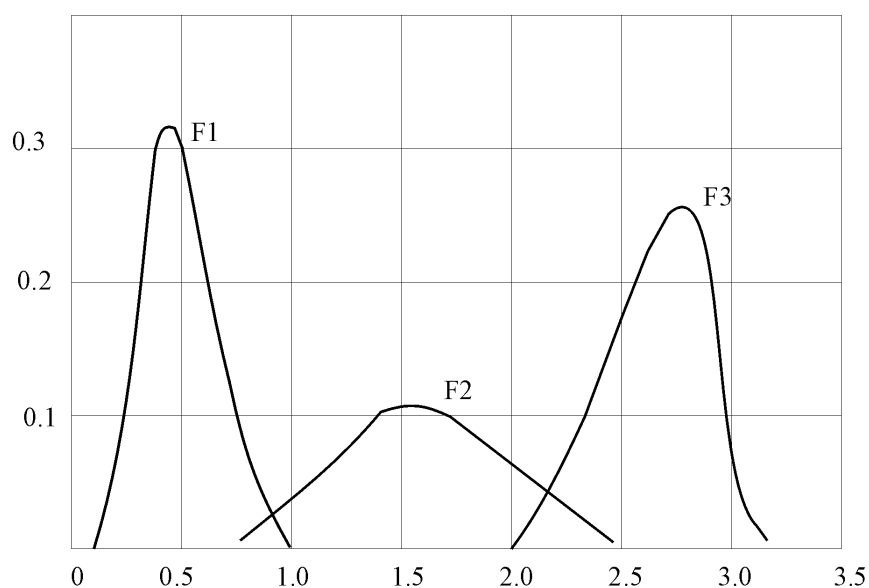


Рис.1.12. Плотность встречаемости формант.

Выделение формантных областей осуществляется пропусканием речевого сигнала через гребенку полосовых фильтров (ПФ) с соответст

$$R_{ab} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x_a(t)x_b(t)dt \quad (1.31)$$

вующими полосами пропускания. Полосы этих ПФ соответственно частотному распределению формант и полосе канала ТЧ выбраны следующими:

300.....850 Гц (для ПФ1);

850....2350 Гц (для ПФ2);

2350....3400 Гц (для ПФ3).

**Значение коэффициента корреляции между огибающими вычисляется по формуле:**

На основе анализа изменения значений коэффициентов корреляции, можно найти оценку коэффициента натуральности. Для анализа изменения коэффициентов корреляции, здесь полезно использовать величину  $R_{отн.}$  – относительный коэффициент натуральности.

Значения  $R_{отн.}$  вычисляются по следующей формуле:

$$R_{отн.} = \frac{1}{3} \left( \frac{R_{12}}{Ro_{12}} + \frac{R_{13}}{Ro_{13}} + \frac{R_{23}}{Ro_{23}} \right) \quad (1.32)$$

где:  $R_{12}, R_{13}, R_{23}$  - коэффициенты корреляции, полученные в результате измерения реального сигнала;

$Ro_{12}, Ro_{13}, Ro_{23}$  - коэффициенты корреляции, полученные в результате измерения исходного неискаженного сигнала, величина которых составляет:

$Ro_{12} = 0.58$  ;  $Ro_{13} = 0.28$  ;  $Ro_{23} = 0.40$  . [6].

Результаты измерения для неискаженного сигнала показаны на рис.1.13.

График построен по результатам измерений для 50 неискаженных разных речевых сигналов.

Средние значения коэффициентов корреляции:

$$R_{12} = 0,5770 ; R_{13} = 0,2773 ; R_{23} = 0,3975 ; R_{отн.} = 0,99.$$

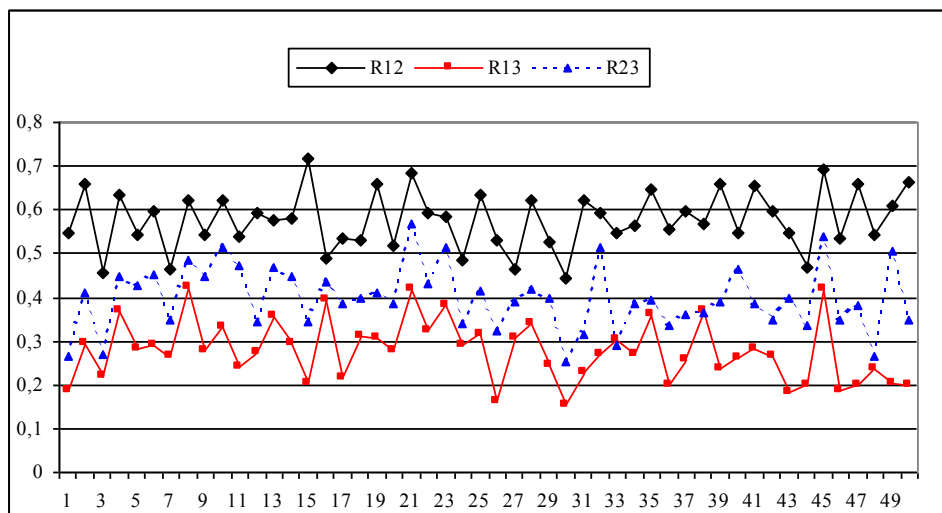


Рис.1.13. Коэффициенты корреляции для неискаженных сигналов.

Результаты измерения для искаженного сигнала показаны на рис.1.14.

График построен по результатам измерений для 50 искаженных речевых сигналов (сигнал сильно зашумлен – отношение сигнал/шум равно 10дБ).

Средние значения коэффициентов корреляции в этом случае:

$$R_{12} = 0,3043 ; R_{13} = 0,0570 ; R_{23} = 0,0471 ; R_{отн.} = 0,28 .$$

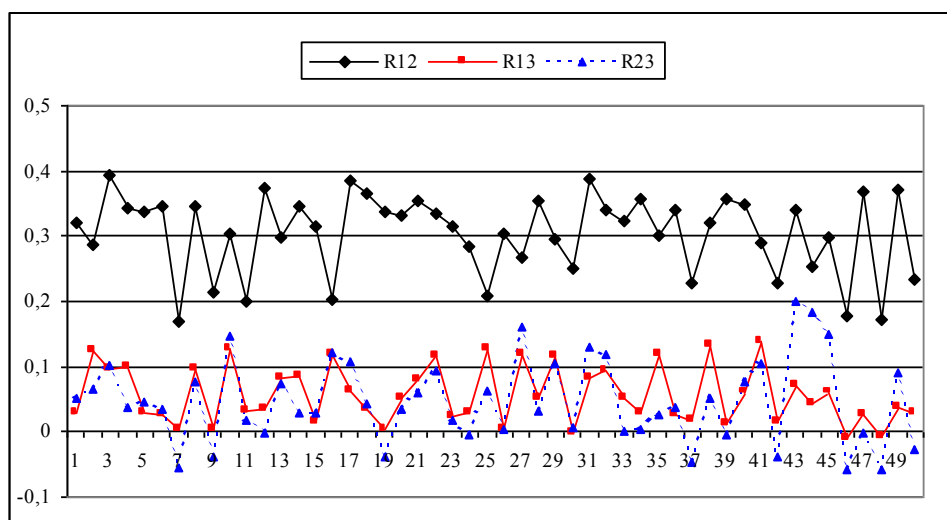


Рис.1.14. Коэффициенты корреляции для искаженных сигналов.

Результаты измерения для шума показаны в таблице 1.13.

Значения коэффициентов корреляции составляют:

$$R_{12} = 0,1045 ; R_{13} = -0,0958 ; R_{23} = 0,1019 ; R_{отн.} = 0,0309.$$

Результаты измерения для неречевого сигнала (музыкального типа) также показаны в Таблице 4.

Значения коэффициентов корреляции:

$$R_{12} = 0,0233 ; R_{13} = -0,0366 ; R_{23} = 0,0574 ; R_{отн.} = 0,0177$$

Таблица 1.13. Значения коэффициентов корреляции.

Сигнал	$R_{12}$	$R_{13}$	$R_{23}$	$R_{отн.}$
Неискаженный	0,5770	0,2773	0,3975	0,99
Искаженный	0,3043	0,0570	0,0471	0,28
Шумовой	0,1045	- 0,0958	0,1019	0,03
Музыкальный	0,0233	- 0,0366	0,0574	0,02

Из результата измерения видно, что:

- для неискаженного сигнала среднее значение  $R_{отн.}$  высоко, и значение  $R_{отн.}$  для большинства случаев не ниже 0,8;
- для искаженного сигнала, среднее значение  $R_{отн.}$  уменьшается до 0,3;



- для неречевого сигнала (шума, музыкального сигнала) среднее значение  $R_{отн.}$  уменьшается до 0,01.

В соответствии с пятибалльной системой оценки качества передачи, в Таблице 1.14 предлагается следующая градация для вычисления значения коэффициента натуральности.

Таблица 1.14. Оценка качества передачи по критерию натуральности.

$R_{отн.}$	$K_{натуральности}$
$\geq 0.8$	4
$\geq 0.5$	3
$\geq 0.3$	2
$\geq 0.2$	1
$< 0.2$	0

## Выводы

1. Подробное рассмотрение структуры речевых сигналов даёт возможность правильно определить не только те параметры, которые подлежат контролю, но и определить основные критерии оценки качества передачи РС, объединив их в интегральный критерий (обобщённый критерий).
2. Разработанные ранее субъективные методы контроля качества передачи РС по каналу мобильной связи, неприемлемы по следующим причинам:
  - необходимость привлечения многочисленной тренированной бригады операторов;
  - трудоёмкость и длительность проведения измерений и обработки полученных результатов;

- необходимость в специально оборудованных помещениях (заглушенных и акустически совершенных).
3. Известные объективные методы контроля качества передачи РС, неприемлемы по следующим причинам:
- применяемые ранее технические сравнительные объективные методы нецелесообразно использовать для автоматического контроля из-за необходимости прерывания связи на время проведения испытаний. Другим недостатком методов является необходимость содержания сложных и несовершенных устройств измерений;
  - разработанные ранее технические прямые объективные методы нецелесообразно использовать из-за того, что методы не учитывают удельный вес каждого компонента в интегральном критерии оценки качества.
4. Отмеченные выше недостатки существующих методов контроля требуют разработки нового усовершенствованного метода объективной оценки качества передачи РС по каналам мобильной связи без участия операторов и без перерыва связи. При этом метод должен учитывать влияние каждого компонента в интегральном критерии оценки качества.
5. В результате анализа интегрального критерия качества установлена цифровая пятибалльная шкала оценки; рассчитаны пороговые значения оценок по критериям громкости, разборчивости, натуральности с учетом основных характеристик канала связи. Данные результаты дают возможность использовать их при разработке функциональной схемы устройства контроля.
6. Разработаны методы определения интегрального критерия оценки качества. Анализ этих методов показывает, что арифметический интегральный критерий удовлетворяет всем требованиям и допускает

количественную оценку качества передачи речевой информации по мобильным каналам связи.

7. Разработан новый усовершенствованный метод оценки, позволяющий объективно контролировать качество передачи речевой информации. Наиболее важными из всех характеристик приемной части УК в целом являются:

- чувствительность, совпадающая с чувствительностью естественного уха;
- высокая точность измерения.

Именно на эти характеристики следует обратить особое внимание при разработке математической модели УК.

8. Предлагаемая методика объективной оценки качества передачи речевой информации по мобильным каналам связи, базирующаяся на основе понятия эквивалентного по мешающему воздействию уровня шума, позволяет адекватно оценить интегральное мешающее воздействие основных для каналов данного типа факторов: шума телефонного канала, остаточного эхосигнала и клиппирования сигнала ближнего абонента.

9. Практическая реализация предлагаемой методики возможна при использовании корреляционного принципа обнаружения речевых сигналов на фоне шумов, позволяющего дифференцировать вклад в интегральную объективную оценку качества передачи основных мешающих факторов и оценить общее качество передачи с учетом степени субъективного мешающего воздействия этих факторов.

## ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА РАБОТЫ УСТРОЙСТВА КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПЕРЕДАЧИ РЕЧИ ПО КАНАЛАМ МТС И СОЗДАНИЕ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

### 2.1. Критерий эффективности объективной оценки качества передачи речи при различных методах контроля

Оценка эффективности различных методов контроля качества передачи информации может осуществляться с помощью критериев, определяющих его основные составляющие.

Предлагаемый обобщенный критерий эффективности существующих и вновь разрабатываемых методов оценки качества передачи речевых сигналов может состоять из следующих составляющих:

$$K_{\text{обобщ.}} = \alpha_1 \cdot K_{\text{кач.}} + \alpha_2 \cdot K_{\text{слож.}} + \alpha_3 \cdot K_{\text{функ.}} \quad (2.1)$$

где:

$K_{\text{обобщ.}}$  - обобщённый критерий эффективности методов;

$K_{\text{кач.}}$  - критерий оценки качества передачи речи;

$K_{\text{слож.}}$  - критерий сложности технической реализации метода оценки передачи речи;

$K_{\text{функ.}}$  - универсальность функционирования рассматриваемого метода;

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  - весовые коэффициенты.

Первый критерий -  $K_{\text{кач.}}$  оценка, которого отражает основные характеристики методов измерения качества передачи речевого сигнала по каналам связи (объективность измерения, время проведения контроля, без перерыва связи или с перерывом связи, точность получаемой оценки). Кроме того, качество работоспособности проектируемого устройства оценки качества в значительной степени зависит от выбора критериев оценки качества передачи информации (динамические характеристики

канала, прямые показатели звуковой информации: громкость, разборчивость, натуральность, узнаваемость).

Второй критерий  $K_{\text{слож.}}$  - вычислительная сложность технической реализации метода оценки качества передачи речи, связывает внутреннюю характеристику вычислительной сложности с такими характеристиками, как стоимостные, технологические, надёжностные и другие. Действительно, вычислительная сложность (число операций действительного умножения, число элементарных операций обработки сигнала или любая другая подобная характеристика) определяет требуемую производительность, быстродействие для работы систем в реальном масштабе времени. Это, в свою очередь, определяет выбор элементной базы, конкретизирующей перечисленные внешние характеристики. Как и другие методы построения систем передачи информации, степень вычислительной сложности технической реализации устройства контроля качества передачи речевой информации по каналам мобильной связи (УК) зависит от конфигурации его построения.

Под третьим критерием, учитывающим универсальность функционирования  $K_{\text{функ.}}$  проектируемого УК, будем понимать степень независимости его работоспособности от параметров функционирования (от структуры канала, от мест подключения). Конкретная совокупность пространства функционирования образует конкретные условия функционирования. Поскольку параметры пространства функционирования меняются, правомерно говорить о существовании некоторого пространства условий функционирования.

Многокомпонентный критерий метода оценки качества передачи речи по каналам связи усложняется соответствующим выбором весовых коэффициентов. Данный выбор должен проводиться на основе экспериментальных оценок соотношения значимости рассматриваемых показателей.

На основании экспертных оценок, получаемых в результате опытной эксплуатации каналов связи, предназначенных для передачи речи, критерий качества занимает значительную степень, то есть  $\alpha_1=0,5$ ,  $\alpha_2=0,2$ ,  $\alpha_3=0,3$ .

Поэтому в дальнейшей работе по созданию УК будет уделено большое внимание алгоритму его функционирования. В качестве основного критерия будет принят критерий оценки качества, также при этом будут учитываться критерии вычислительной сложности и функционирования.

## **2.2. Выбор места подключения устройства контроля качества передачи речевой информации по каналам мобильной связи**

Для оценки качества передачи речевого сигнала от источника акустического сигнала (ИС) до слушающего абонента Б (получателя сигнала) при проводной связи устройство должно:

- подключаться в точках между преобразователями канального сигнала в первичный (КС - ПС) и первичного сигнала в канальный (ПС - КС);
- желательно размещать контрольную измерительную аппаратуру только на одном конце канала связи, чтобы дать возможность автоматизации процесса объективного измерения.

В связи с указанными требованиями следующий вариант решения задачи. Модель тракта связи даёт возможность определить точки подключения контрольного устройства для оценки качества передачи информации. На Рис. 3.2 показаны эти точки в общей схеме тракта передачи речевого сигнала (точки А и Б).

На Рис. 2.2 введены следующие обозначения:

ИС – источник речевого сигнала,

ФПС – формирователь первичного сигнала,

ПС-КС – преобразователь первичного сигнала в канальный,

КС-ПС – преобразователь канального сигнала в первичный,

УК – устройство контроля качества передачи речевой информации по проводным каналам связи.

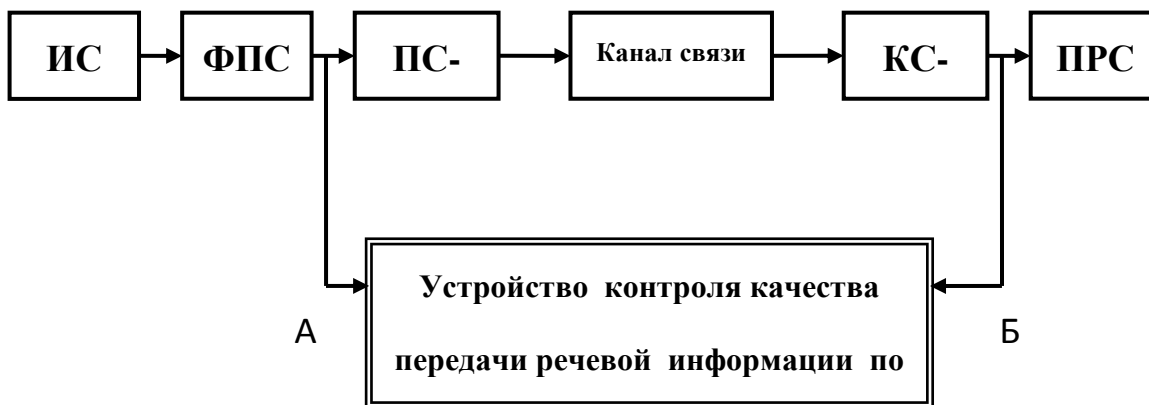


Рис.2.2. Подключение УК при проводной связи.

При этом варианте **УК** должно представлять собой совокупность трёх субблоков (передающего, приёмного и обрабатывающего).

Блок обработки территориально может быть расположен как вблизи передающего, так и приёмного блоков контрольного устройства – всё зависит от пункта заинтересованности получения конечного результата оценки качества передачи речевого сигнала (РС). Но в этом случае следует помнить о том, что данные, полученные на выходах блоков либо передающего, либо приёмного, должны быть транспортированы в то место, где расположено устройство обработки **УК**.

Второй вариант подключения при проводной связи предусматривает расположение его на одном из конечных пунктов. Целесообразно располагать устройство контроля, по всей видимости, на передающем конце, так как эталонное значение информационного сообщения находится именно здесь. Однако для передачи РС на передающую станцию потребуется канал связи обратного направления (так же, как при передаче данных или телеграфных сообщений с квитанцией), параметры которого должны быть совершенно идентичны параметрам канала связи прямого направления.

Для получения достоверных данных при оценке качества передачи РС, необходимо, чтобы коэффициенты узлов обратного направления передачи

были бы совершенно идентичны коэффициентам передачи аналогичных узлов прямого направления передачи. При вычислении величины коэффициента качества передачи РС в этом случае требуется учесть то обстоятельство, что удваивается число мешающих факторов, вызывающих искажение РС в точке подключения УК.

УК определяет оценку качества передачи речевой информации от говорящего абонента А до слушающего абонента Б ( $K_{AB}$ ), которая формируется из двух отдельных составляющих оценок качества передачи информации  $K_1$  и  $K_2$ , где:

$K_1$  – оценка качества передачи от говорящего абонента А;

$K_2$  – оценка качества от слушающего абонента Б.

Тогда, учитывая то обстоятельство, что истинная оценка качества передачи речи от абонента А до абонента Б определяется из составляющих  $K_1$  и  $K_2$ ,  $K_{AB}$  считают равной:

$$K_{AB} = \frac{K_1 \cdot K_2}{K_{\max}} \quad (2.2)$$

где:  $K_{\max}$  – выбранная максимальная оценка.

Использовать ранее предложенные схемы подключения УК к каналу при организации мобильной телефонной связи (МТС) не представляется возможным. Это заключение объясняется тем, что в данном случае существенно меняются функции самого УК. Прежде всего, устройство контроля должно не только определить реальные величины основных составляющих интегрального коэффициента качества ( $K_{гр}$ ,  $K_{разб}$  и  $K_{нат}$ ), но и иметь возможность воздействовать на отдельные параметры приёмного устройства РС («мобильника») при условии значительного отклонения реальных величин составляющих от эталонных значений. Величины эталонных составляющих интегрального коэффициента качества определяются изготовителем приёмно-передающих устройств (телефонных аппаратов), применяемых при мобильной связи. Следовательно, можно сделать вывод о том, что УК должно непосредственно входить в состав



мобильного телефонного аппарата. На Рис. 2.4 изображена схема подключения УК при организации мобильной связи.

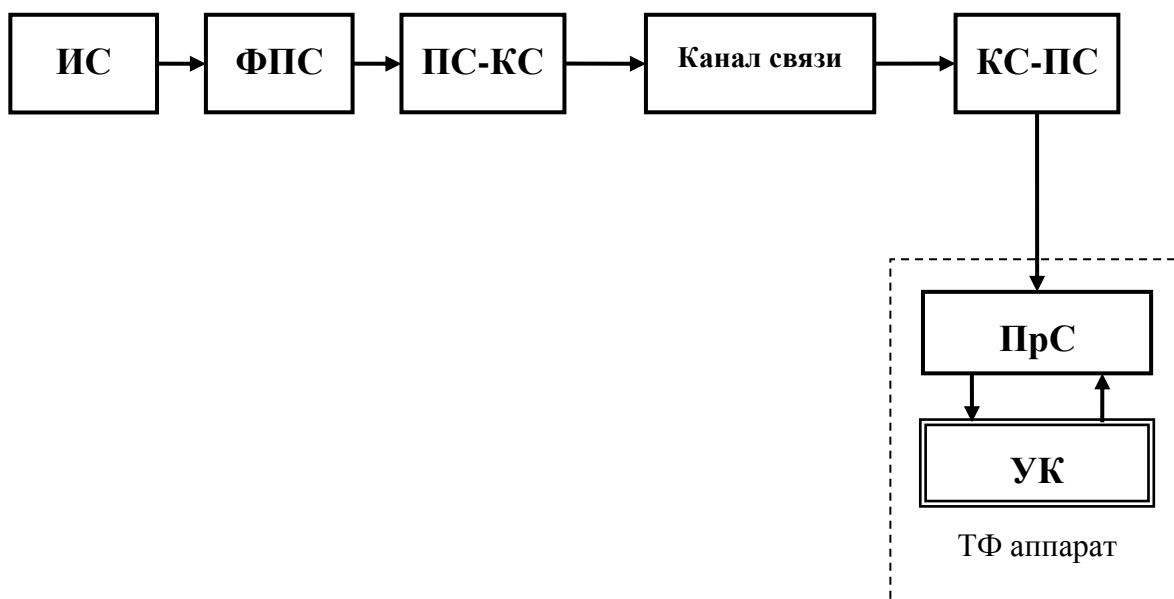


Рис. 2.4. Подключение УК при мобильной связи.

#### 2.4. Функциональная схема устройства контроля качества передачи речи при мобильной связи

В состав схемы устройства объективного контроля качества передачи речи при мобильной связи входят следующие блоки (рис.2.5):

1. **Определители** – определяют (вычисляют) величины реальных коэффициентов качества передачи речи по каналу по критериям громкости, разборчивости и натуральности  $K_{гр}$ ,  $K_{разб.}$  и  $K_{натур.}$
2. **Блок эталонных значений коэффициентов** – блок, в котором хранятся эталонные значения коэффициентов  $K_{гр.эт.}$ ,  $K_{разб.эт.}$  и  $K_{натур.эт.}$
3. **Сравнивающее и управляющее устройство.** Данное устройство сравнивает величины реальных коэффициентов качества передачи речи с их эталонными значениями, а на основании этого сравнения вырабатывает сигналы управления (СУ), которые возвращает обратно в приемник. Как уже упоминалось выше, данные сигналы служат для

того, чтобы регулировать параметры приема в случае сильного отклонения реальных параметров от эталонных.

Величины эталонных значений  $K_{гр.эт}$ ,  $K_{разб.эт}$  и  $K_{натур.эт}$  устанавливаются изготовителем (но не менее 3-х баллов по пятибалльной шкале оценок от 0 до 4-х). То есть УК встраивается в мобильный телефон на заводе, а в зависимости от того, будет ли считаться эталонной оценка 3 или 4, будет устанавливаться цена на этот телефонный аппарат.



Рис.2.5. Функциональная схема УК.

## 2.5. Алгоритм работы устройства объективной оценки качества передачи речевой информации

В данном пункте мы разработаем алгоритм работы устройства объективной оценки качества передачи речевой информации. Как было показано выше, в пункте 2.2.1, лучшим способом оценки качества передачи речевой информации по мобильному каналу связи является интегральный критерий оценки.

С учётом формулы 2.13 и того, что в нашем случае мы оцениваем качество по трём параметрам – по критерию громкости, разборчивости и натуральности, получаем следующую формулу для определения интегральной оценки качества передачи:

$$K_{интегр} = 3 \cdot \sqrt[3]{A_{гp} \cdot A_{разб} \cdot A_{натур}} \quad (2.3)$$

где:

$$\begin{aligned} A_{гp} &= \mu_1 \cdot K_{гp}, \quad \mu_1 = 0,25 \\ A_{разб} &= \mu_2 \cdot K_{разб}, \quad \mu_2 = 0,5 \\ A_{натур} &= \mu_3 \cdot K_{натур}, \quad \mu_3 = 0,25 \end{aligned} \quad (2.4)$$

Достоинствами данного метода вычисления интегрального критерия оценки являются:

1. Если один из критериев оценки качества передачи равен нулю, то и интегральный критерий равен нулю;
2. В данной формуле учитываются весовые коэффициенты, указывающие на вклад каждой компоненты в интегральный критерий оценки.

Каждый из критериев (громкость, разборчивость и натуральность) оценивается по пятибалльной шкале в соответствии с таблицей 2.3.

Подробнее о каждом из критериев написано в Главе 1 (пункт 1.3.).

Таблица 2.3. Сводная таблица оценки качества передачи речи в баллах по критериям громкости, разборчивости и натуральности.

Оценка качества (баллы)	Уровень речевого сигнала $p_{pc}$ (дБ) (оценка по громкости)	Отношение сигнал/шум (дБ) (оценка по разборчивости)	Значение $R_{отн}$ (оценка по натуральности)
4	$\geq -16,6$	$\geq 30$	$\geq 0,8$
3	$\geq -25,2$	$\geq 20$	$\geq 0,5$
2	$\geq -34,0$	$\geq 10$	$\geq 0,3$
1	$\geq p_{ш}$	$\geq 0$	$\geq 0,2$
0	$< p_{ш}$	$< 0$	$< 0,2$

Величина  $R_{отн}$  вычисляется по формуле 2.27 после измерений коэффициентов корреляции  $R_{12}$ ,  $R_{23}$ ,  $R_{13}$ .

Защищенность, определяющая отношение сигнал/шум в канале, вычисляется по формуле:

$$A_{защ} = 10 \lg (P_{pc}/P_{ш}) \quad (2.5)$$

После определения параметров передачи реального речевого сигнала они сравниваются с эталонными и на основании этого выносятся оценка качества передачи речи по пятибалльной шкале по критерию громкости, разборчивости и натуральности, а затем вычисляется интегральный критерий оценки качества передачи речи по мобильному каналу связи по формуле 2.3. Алгоритм работы устройства представлен на Рис. 2.6.

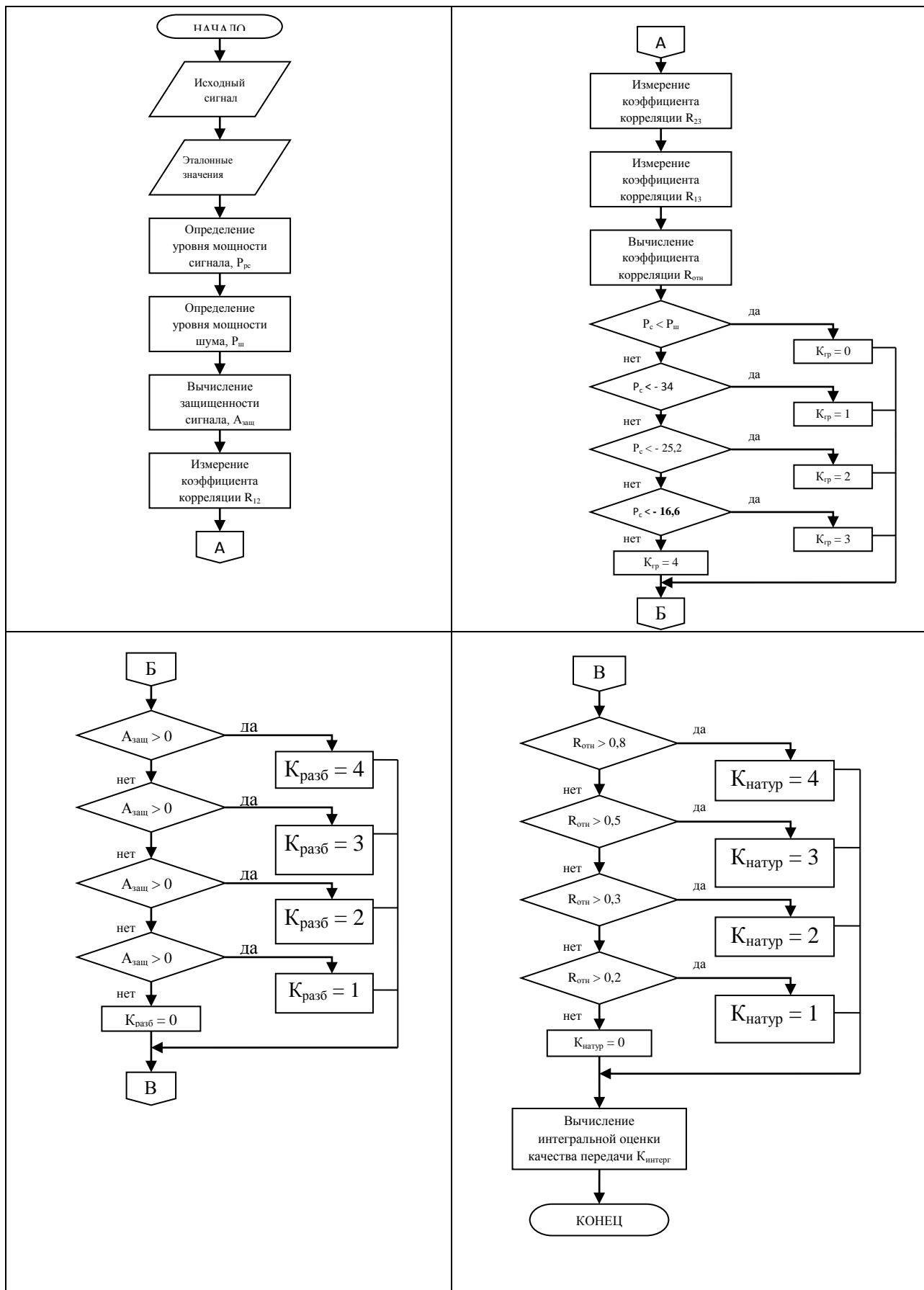


Рис. 3. Схема алгоритма программной реализации метода объективной оценки качества передачи РС по каналам мобильной связи.

Рис. 2.6. Схема алгоритма программной реализации способа объективной оценки качества передачи РС по каналам мобильной связи.

## **2.6. Имитационная модель эксперимента, определяющего работоспособность устройства объективной оценки качества передачи речевой информации по каналу мобильной связи**

В данном разделе мы рассмотрим функциональную модель, которая описывает процесс прохождения сигнала через основные узлы канала связи и процесс сложения шума и сигнала. Эта имитационная модель была разработана [30] для оценки качества передачи речевой информации по каналам связи, то есть мы можем использовать её в наших целях. Однако, в данном случае, считаем, что имитационная модель должна быть несколько изменена - модернизирована.

На основе представленной функциональной модели строится математическая модель устройства, реализующего предлагаемую методику оценки качества передачи информации по каналам мобильной связи. Ниже проведен анализ некоторых узлов имитационной модели.

Для моделирования разрабатываемой методики оценки качества передачи речевой информации по каналам мобильной связи предлагается функциональная схема модели эксперимента, представленная на Рис. 2.7

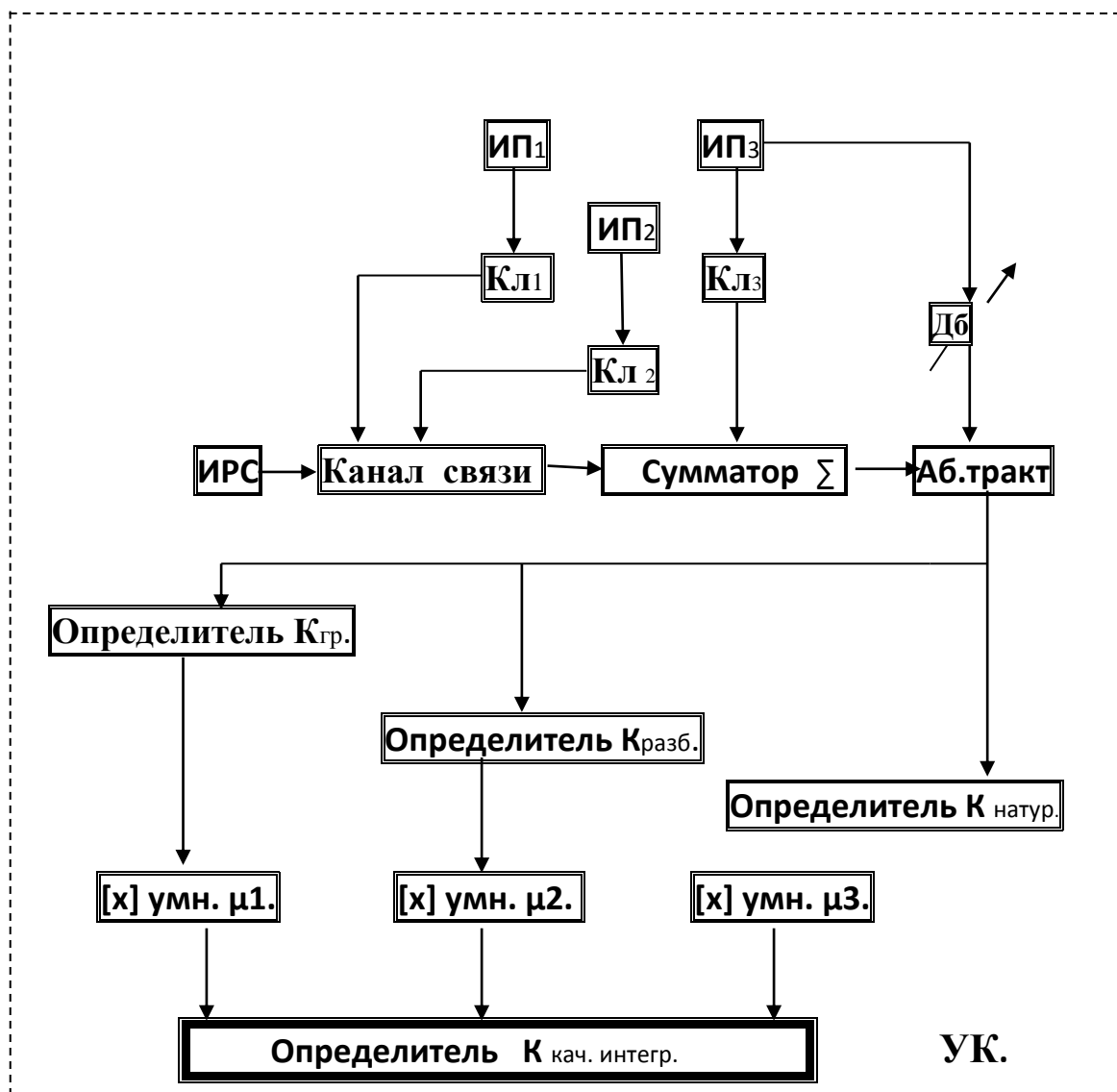


Рис. 2.7. Схема модели эксперимента.

В состав модели эксперимента входят функциональные узлы, назначение которых будет описано достаточно подробно ниже.

В представленной схеме введены следующие обозначения:

**ИРС** - источник речевого сигнала;

**ИП** - источник помехи;

**Кл** - ключевое устройство; **Аб.тракт** – абонентский тракт;

**[x] умн.** - устройство умножения;

**Кгр., Кразб. и Кнатур.** - коэффициенты громкости, разборчивости и натуральности (составляющие интегрального коэффициента качества **Ккач.интегр.**);

**μ1, μ2 и μ3** - весовые коэффициенты;

Дб. - магазин затуханий.

**Источниками речевых сигналов(ИРС)** являются речевые файлы, записанные в формате wav. В этом формате речевой сигнал представляет собой отчёты, следующие с интервалом 125 мкс ( $f_d = 8$  кГц) [30].

В качестве голосов для записи были выбраны голоса русских теледикторов, что обеспечивает высокую разборчивость и низкий дефект произношения.

Время для проведения одного измерения составляет примерно 2 с, общее число измерений составляет 30 и алгоритм рассчитан на активную часть речи. Поэтому время записи выбрано намного более 1 мин. И в речевых файлах предварительно отрезаны межфразовые паузы. Запись и предварительная обработка речевого сигнала на ЭВМ осуществляется с помощью программы CoolEditPro (version 1.2).

Речевые файлы называются sp1.wav, sp2.wav...

Отрезок активной речи из файла sp1.wav показан на Рис. 2.8. Здесь длительность отрезка составляет 0,128с (число отчетов равно 1024).

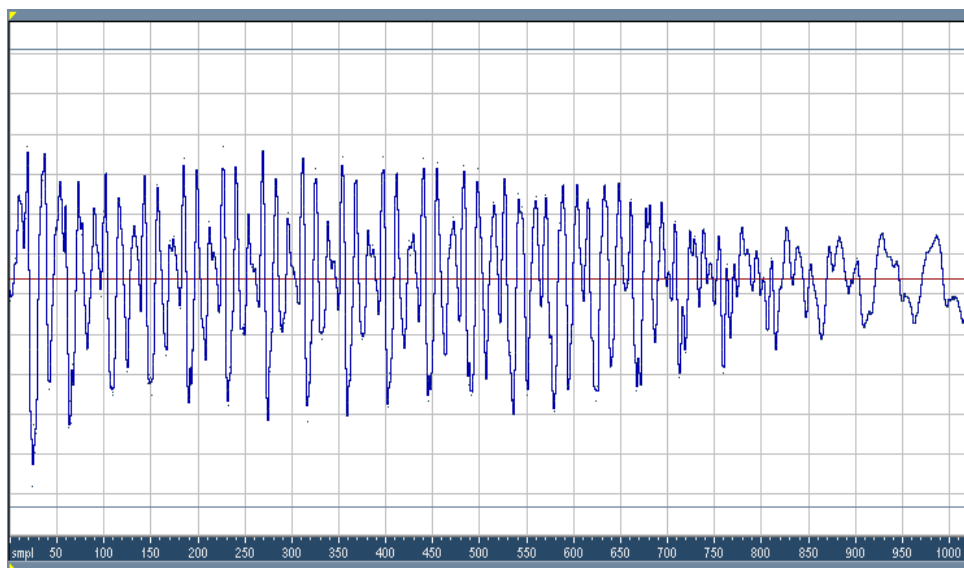


Рис.2.8. Речевой сигнал sp1.

**Источниками помех (ИПі)** являются:



1. В качестве **ИП1** для моделирования используется гладкий шум с равномерным спектром. Шум записан в формате wav. Генерация шума осуществляется с помощью программы CoolEditPro. На Рис. 2.9 представлен отрезок шума длительностью 0,128 с, и на Рис. 2.10 – спектр шума.

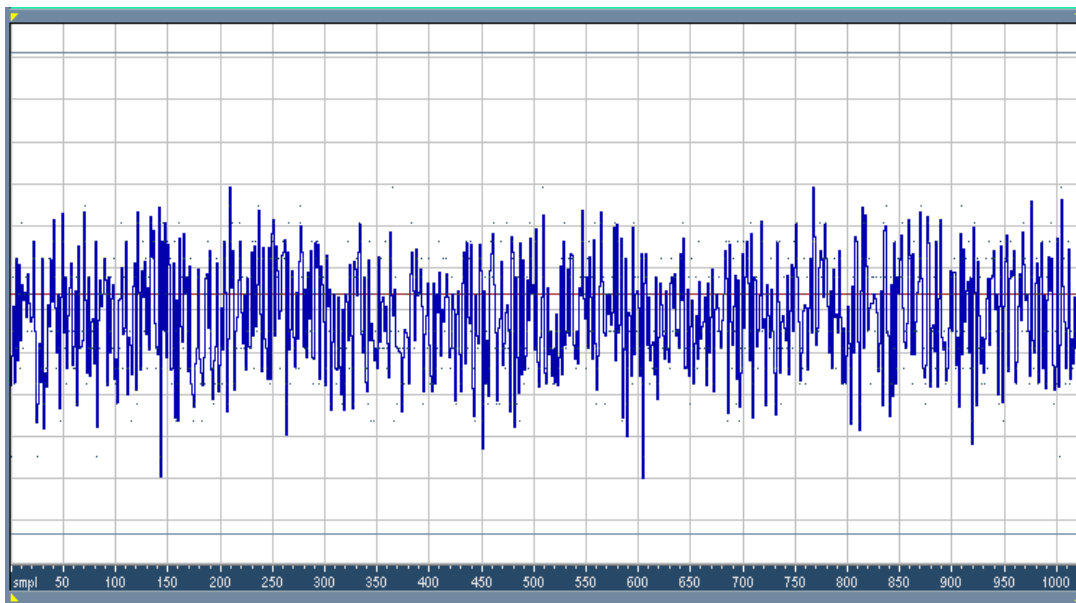


Рис.2.9. Диаграмма отрезка шума длительностью 0,128 с (1024 отчета).

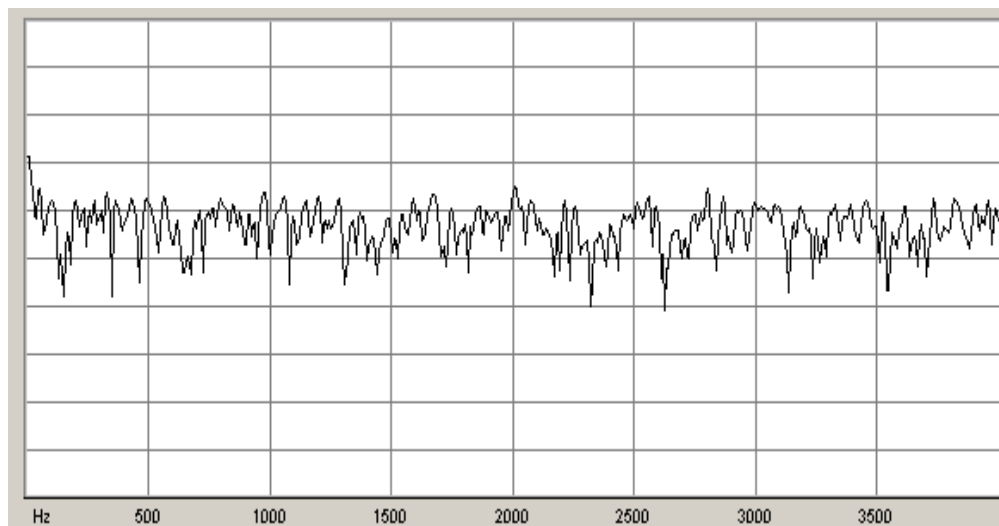


Рис.2.10. Спектр шума в полосе 0,0...4,0 кГц.

Известно, что мешающее действие шума зависит не только от его мощности, но и от частоты, так как чувствительность уха и телефона различна на разных частотах и максимальна в спектре частот 0,8...1,2 кГц (см. п.3.2).

Для учёта указанного обстоятельства вводится понятие психофотметрического напряжения шума, которое определяется как напряжение с частотой 800 Гц, мешающее действие которого эквивалентно мешающему действию всех составляющих спектра шума. Психофотметрическое напряжение шума в канале передачи с эффективно передаваемой полосой частот от  $f_1$  до  $f_2$  рассчитывается по формуле [37]:

$$U_{\text{ппс}} = \sqrt{\int_{f_1}^{f_2} k_f^2 U_{\text{пф}} df}, \quad (2.6)$$

где:

$k_f$  - коэффициент чувствительности;

$U_{\text{пф}}$  - спектральная плотность шума.

Для шума с равномерным спектром  $U_{\text{пф}} = U_{\text{п}} = \text{const}$ .

Тогда  $U_{\text{ппс}} = k_{\text{пс}} U_{\text{п}}$ . (2.7)

где:  $U_{\text{п}}$  - действующее значение шума;

$k_{\text{пс}} = \sqrt{\int_{f_1}^{f_2} k_f^2 df}$  - психофотметрический коэффициент, который для стандартного канала ТЧ с эффективно передаваемой полосой 0,3...3,4 кГц равен 0,75.

Учитывая вышеизложенное, в расчётах моделирования использовалось психофотметрическое значение напряжения шума, а не его действующее значение.

На основании результатов моделирования были сделан вывод, что следует использовать интегральный критерий оценки качества, включающий в себя все основные составляющие критерия оценки качества (громкость, разборчивость, натуральность), а также пятибалльную систему оценок [30].

2. В качестве ИП2 для моделирования используется сигнал электрического эха, записанный в формате wav. В этом формате сигнал электрического эха, сформированный на базе речевого сигнала, получаемого из блока «Аб.тракт», задержанного по времени и

ослабленного по мощности, представляет собой отчёты, следующие синтервалом 125 мкс ( $f_d = 8$  кГц) [30]. Задержка эхосигнала обеспечивается ключевым устройством **Кл2**, а ослабление - магазином затухания (**Дб.**)

3. В качестве **ИПЗ** в имитационной модели используется речевой сигнал, отличный от сигнала источника **ИРС**. Указанный сигнал имитирует помеху «внятного переходного разговора». Мощность сигнала помехи устанавливается непосредственно в блоке **ИПЗ**, а подача его в сумматор осуществляется с помощью ключевого устройства **Кл3**, запускаемого командой, поступающей из блока «**Канал связи**». Сигнал помехи внятного переходного разговора записан в формате wav.

Блок «Канал связи», используемый в модели эксперимента, может быть представлен в разных вариантах: всё определяется структурой реального канала связи. В реальных условиях каналы связи предлагается классифицировать следующим образом:

- проводные каналы связи. В таких каналах используются проводные направляющие среды (воздушные линии связи, металлические или оптические кабели);
- составные каналы связи. Направляющие среды, применяемые в указанных каналах, представляют собой сочетание различных линий связи (проводные, радиорелейные, спутниковые);
- эфирные каналы связи. В каналах связи этой группы используются радиорелейные и спутниковые направляющие среды.

Учитывая универсальность предлагаемого варианта имитационной модели эксперимента, возможно применить любой из перечисленных классов каналов связи.

Каналы мобильной связи относятся к классу составных каналов связи. Поэтому, при проведении данного эксперимента, целесообразно использовать второй класс каналов связи. В таких каналах присутствуют все, перечисленные выше виды помех, (см. раздел 3 главы 1).

«Сумматор  $\Sigma$ » осуществляет формирование реального сигнала, т. е. смеси информационного сигнала и помехи.

«Определители  $K_{гр}$ ,  $K_{разб}$  и  $K_{натур}$ » осуществляют вычисление отдельных составляющих интегрального коэффициента качества. Вычисления производятся по методикам, изложенным в разделах 1.4, 2.5 и 2.6.

«[x] умн. ці.» - устройство умножения, позволяющее учесть весовой коэффициент отдельных составляющих интегрального коэффициента качества.

«Определитель  $K_{кач.интегр}$ » осуществляет вычисление конечной величины интегрального коэффициента качества передачи речевой информации. Вычисление  $K_{кач.интегр}$  производится по формуле 2.3.

Алгоритм работы имитационной модели эксперимента, дающего возможность объективно оценить качество передачи речевой информации по каналам мобильной связи, будет представлен в главе 4.

## **2.7. Эксперимент исследования объективного метода оценки качества передачи речевых сигналов по каналам мобильной связи на базе имитационной модели**

Необходимость эксперимента имитационного моделирования вызвана тем, что:

- следует оценить влияние структуры канала мобильной связи на отдельные составляющие интегрального коэффициента качества и на его величину в целом;
- следует оценить влияние различного вида помех, присутствующих в канале мобильной связи, на качество передачи речевой информации;
- возникает возможность определения реальных значений отдельных составляющих интегрального коэффициента качества и его величины в целом при совместном влиянии структуры канала мобильной связи и различного вида помех;

- разность между эталонными и реальными величинами коэффициентов качества преобразуется в сигналы управления, которые изменяют параметры мобильного аппарата с целью повышения качества передачи, прежде всего, речевой информации;

- появляется возможность оценки целесообразности размещения устройств объективного контроля качества передачи речевой информации либо в индивидуальных приёмо-передатчиках («мобильниках»), либо на базовых или коммутационных станциях сети мобильной связи.

### **2.7.1. План проведения эксперимента исследования объективного метода оценки качества передачи речевой информации по каналам мобильной связи**

1. Определение интегрального коэффициента качества передачи речевой информации (при отсутствии помех) на базе имитационной модели.
2. Определение интегрального коэффициента качества передачи речевой информации при наличии помехи цифрового тракта – Рош. – ИП1, на базе имитационной модели.
3. Определение интегрального коэффициента качества передачи речевой информации (при наличии помехи «эхосигнала» – ИП2) на базе имитационной модели.
4. Определение интегрального коэффициента качества передачи речевой информации (при наличии помехи «гладкий шум» – ИП3) на базе имитационной модели.
5. Определение интегрального коэффициента качества передачи речевой информации при наличии всех видов помех: цифрового тракта – ИП1, эхосигнала – ИП2 и гладкого шума – ИП3 на базе имитационной модели.

## 2.7.2. Разработка математической основы имитационной модели.

Предложенный в рамках настоящей работы метод объективной оценки качества передачи речевой информации по каналам мобильной связи, будет исследован экспериментально с помощью имитационного моделирования.

ЭВМ с использованием реальных речевых сигналов и помех различных видов. Для того чтобы проводить экспериментальное исследование, необходимо разработать математические модели всех основных узлов, входящих в состав имитационной модели.

Для моделирования разрабатываемой методики оценки качества предлагается упрощенная функциональная модель, представленная в виде схемы на Рис. 2.11.

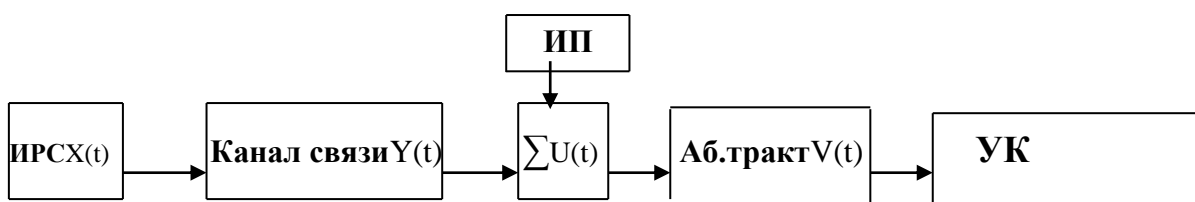


Рис. 2.11. Схема упрощенной функциональной имитационной модели.

Все обозначения основных узлов, представленных на приведённом рисунке, соответствуют обозначениям Рис. 2.7.

Представленная функциональная модель описывает процесс прохождения речевого сигнала через основные узлы тракта мобильной связи и процесс сложения сигналов помехи и информационного.

На основе представленной функциональной модели строится математическая модель устройства, реализующего предлагаемую методику объективной оценки качества передачи речевого сигнала по каналам мобильной связи. Ниже даются описания каждого узла имитационной модели и приводятся математические формулы для программирования.

- **Источник речевого сигнала (ИРС).**

Источником РС являются файлы, записаны в формате wav. В этом формате РС представляет собой отчёты, следующие с интервалом 125 мкс ( $f_d = 8,0$  кГц). Частота дискретизации определена в соответствии с теоремой Котельникова.

В качестве примера, на Рис. 2.12. показана диаграмма отрезка активной речи из файла sp1.wav. Здесь длительность отрезка равна 0,125с. (число отчетов равно 1024).

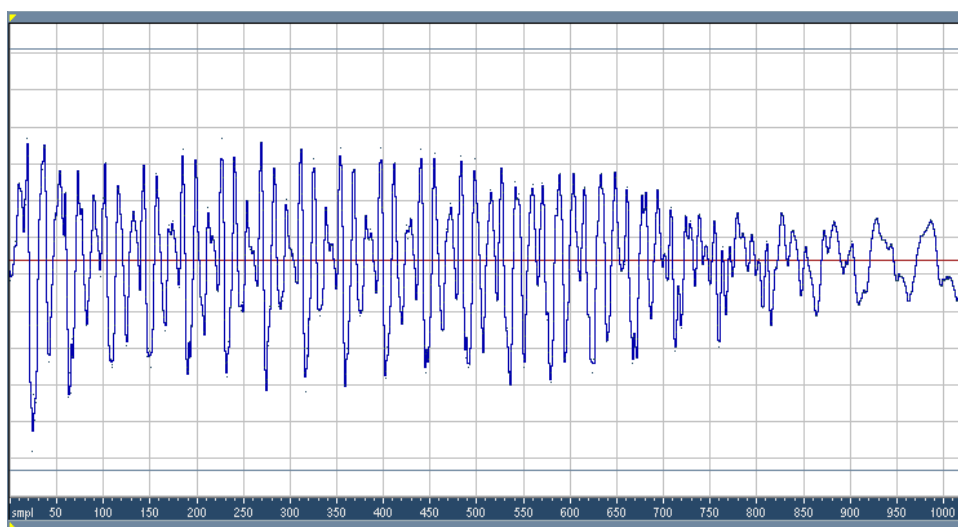


Рис.2.12. Речевой сигнал sp1.

- **Источник помехи (ИП).**

В качестве одного из видов помехи для моделирования, используется гладкий шум с равномерным спектром. Шум записан в формате wav. Генерация шума осуществляется с помощью программы CoolEditPro. На рис. 2.12. приведена диаграмма отрезка шума длительностью 0,125с (1024 отчетов) и на рис. 2.13. - диаграмма спектра шума в полосе 0 – 4,0 кГц.

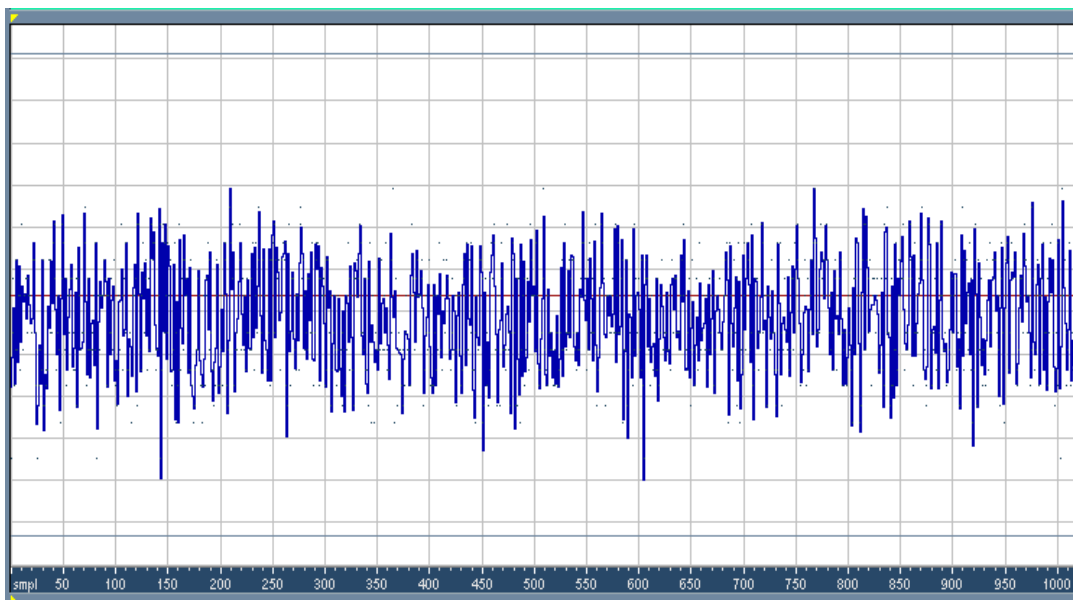


Рис. 2.13. Диаграмма отрезка шума длительностью 0,125с (1024 отчета).

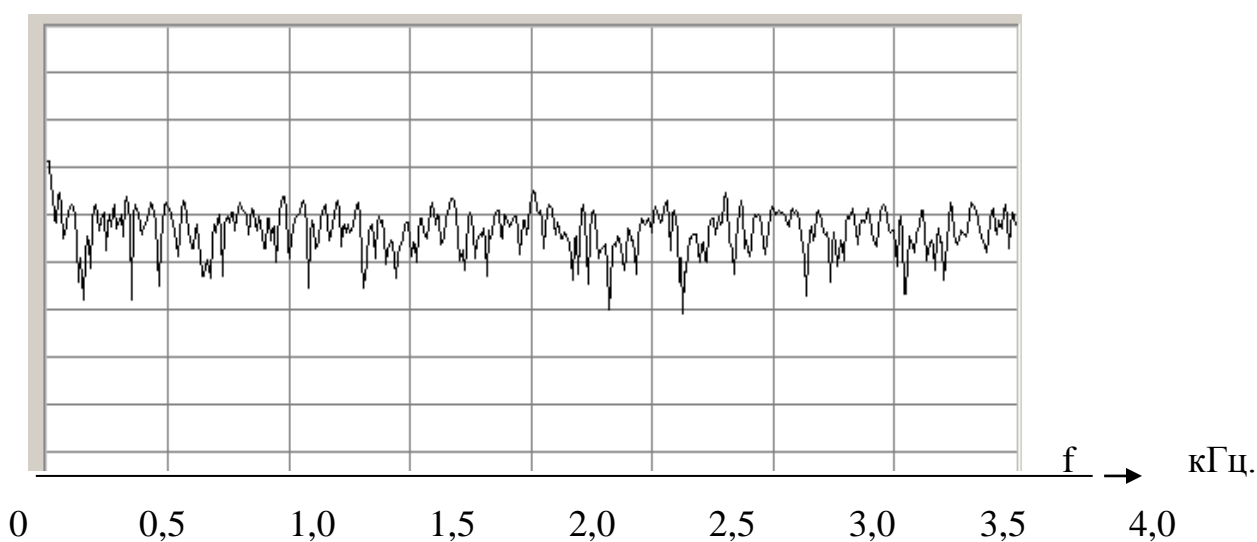


Рис. 2.14. Спектр шума в полосе 0...4,0 кГц.

Известно, что мешающее действие шума зависит не только от их мощности, но и от частоты, так как чувствительность уха и приёмника РС различна на разных частотах и максимальна в спектре частот 0,8...1,2 кГц. Для учёта указанного обстоятельства вводится понятие психофотметрического напряжения шума, которое определяется как напряжение с частотой 800 Гц, мешающее действие которого эквивалентно мешающему действию всех составляющих спектра шума. Психофотметрическое напряжение



шума в канале передачи с эффективно передаваемой полосой частот от  $f_1$  до  $f_2$  рассчитывать по формуле:

$$U_{nnc} = \sqrt{\int_{f_1}^{f_2} k_f^2 U_{nf} df}, \quad (2.8)$$

где:  $k_f$  - коэффициент чувствительности;  $U_{nf}$  - спектральная плотность шума.

Для шума с равномерным спектром  $U_{nf} = U_n = \text{const}$ . Тогда

$$U_{nnc} = k_{nc} U_n. \text{ Здесь } U_n - \text{действующее значение шума; } k_{nc} = \sqrt{\int_{f_1}^{f_2} k_f^2 df} -$$

псофометрический коэффициент, который для стандартного канала связи с эффективно передаваемой полосой 0,0...4,0 кГц равен 0,75.

Учитывая вышеизложенное, в расчётах моделирования целесообразно использовать псофометрическое значение напряжения шума, а не его действующее значение.

Другие виды помех «сигнал электрического эха» и «помеха цифрового тракта» формируются непосредственно из информационного сигнала.

- **Канал связи для передачи РС.**

Структурная схема канала связи показана на Рис. 2.15.

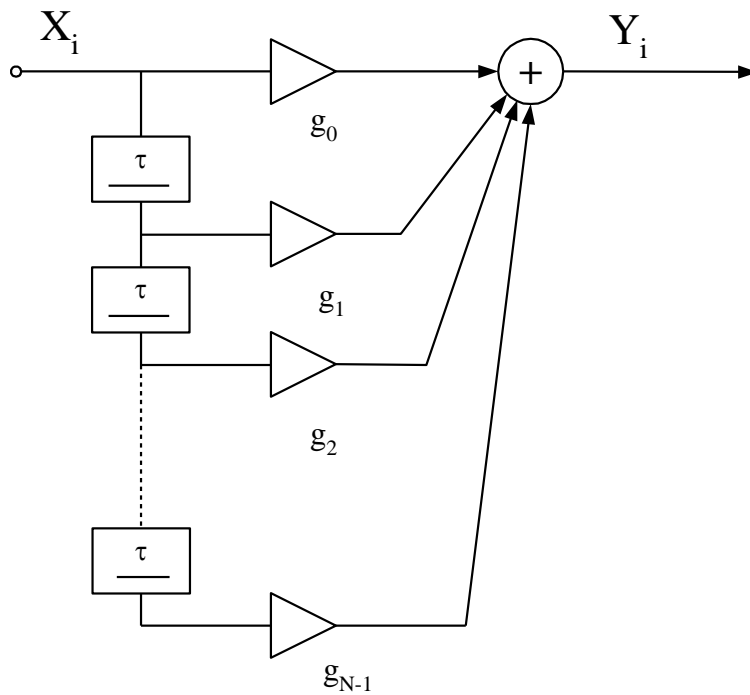


Рис. 2.15. Схема канала связи.

Сигнал  $Y$  на выходе канала связи определяется по формуле:

$$Y_i = \sum_{j=0}^{N-1} X_{i-j} \times g_j, \quad j=0 \dots N-1. \quad (2.9)$$

Значения  $g_j, j=0 \dots N-1$  вычисляются как модуль величины обратного преобразования Фурье коэффициента передачи:

$$g(t) = \text{abs}(\text{ifft}(K(j\omega))), \quad (2.10)$$

где:  $\text{abs}$  – операция вычисления модуля,  $\text{ifft}$  – обратное быстрое преобразование Фурье.

Комплексный коэффициент передачи:

$$K(j\omega) = K(\omega) \cos \varphi(\omega) + K(\omega) \sin \varphi(\omega). \quad (2.11)$$

Число  $N$  выбирается равным 80 из предположения того, что полоса частот от 0 до  $f_b = 4000$  Гц разбивается на 40 полос, ширина которых составляет 100 Гц.

Чтобы получить значение  $K$ , необходимо построить АЧХ и ФЧХ канала связи для передачи РС и рассчитать их значения в дискретных точках.

Зависимость остаточного затухания от частоты называется амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) канала. Если эта зависимость в полосе частот канала связи 0... 4,0 кГц будет постоянной, то в канале будут отсутствовать амплитудно-частотные искажения (АЧИ). Выполнить в полосе частот канала связи частотно-независимую характеристику остаточного затухания невозможно. Этому мешают многие факторы и в первую очередь реальные АЧХ усилителей, трансформаторов, фильтров (особенно полосовых канальных фильтров) и т. д. Поэтому величина остаточного затухания на разных частотах различна. Следовательно, имеется необходимость задать рекомендованную АЧХ канала связи с тем, чтобы АЧИ в нём были не более допустимых значений. Нормируемые величины отклонения остаточного затухания ( $\Delta a_{\text{ост}}$ ) приведены на Рис. 2.16.

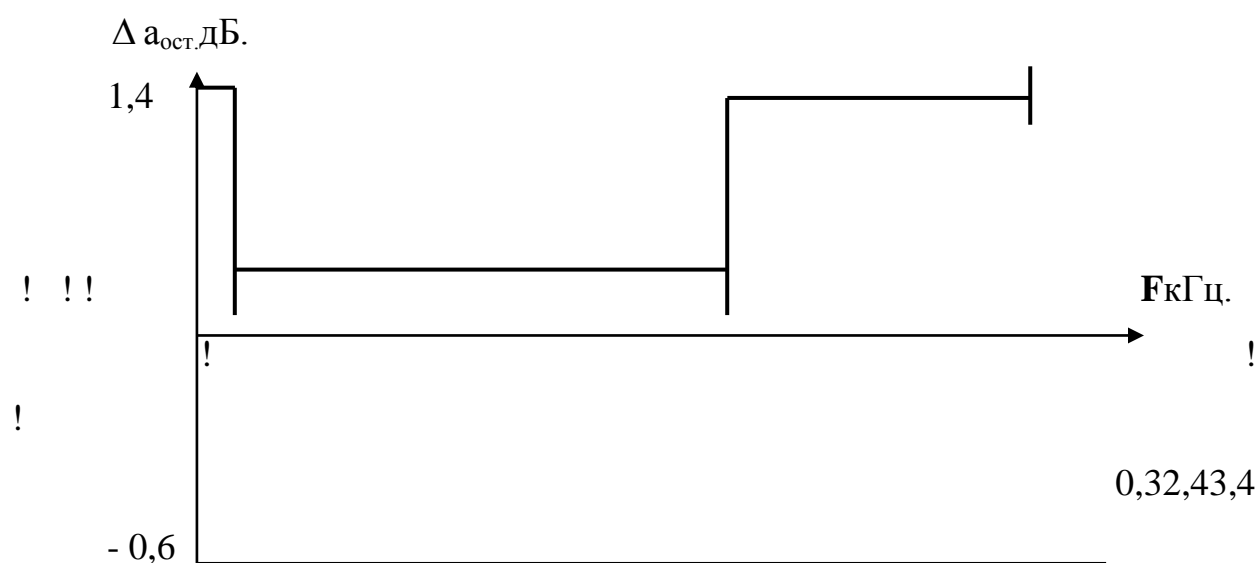


Рис. 2.16. Нормируемые величины отклонения остаточного затухания канала связи.

Зависимость фазового сдвига, вносимого каналом, от частоты называется фазо-частотной характеристикой канала (ФЧХ). В реальных каналах ТЧ ФЧХ отличается от идеальной, т. е. в них имеют место фазо-частотные искажения (ФЧИ). Обычно эти искажения оцениваются

величиной неравномерности группового времени прохождения в полосе частот канала связи для передачи РС.

Нормируются допустимые отклонения величины группового времени прохождения (ГВП) сигнала на любой частоте в пределах 300...3400 Гц от его значения на частоте, при которой ГВП принимает минимальное значение ( $t_{\min}$ ). Допустимая величина неравномерности ГВП для канала связи приведена в Таблице 2.4.

Таблица 2.4.

Обозначение	$\Delta t$ ГВП (мс)
$t_{300} - t_{\min}$	10
$t_{500} - t_{\min}$	2
$t_{3400} - t_{\min}$	3

Частотная зависимость отклонения остаточного затухания канала мобильной связи для передачи РС должна монотонно изменяться, не выходя за нормированные пределы. Известно, что номинальное значение остаточного затухания канала связи, соответственно, равноост. = 7 дБ.

Коэффициент усиления канала  $K$  и угол  $\varphi$  определяются выражениям:

$$K = 10^{\frac{-a_{ост}}{20}} ; \quad (2.12)$$

$$\varphi = 2\pi \times t_{ген} \cdot \quad (2.13)$$

С помощью формул (2.12), (2.13) вычисляем значения  $K(j\omega)$  и  $g_j, j=0...N-1$ .

- **Абонентский тракт (Аб.тракт)**

В предлагаемой математической модели абонентские тракты представлены импульсными характеристиками в виде фильтров с бесконечной импульсной характеристикой, структурная схема которых представлена на Рис. 4.7. Правая по отношению к сумматору часть рисунка представляет собой фильтр с конечной импульсной характеристикой и моделирует ход частотной характеристики фильтра, т.е. поведение частотной характеристики абонентского тракта в соответствии с его длиной. Левая часть моделирует отражение сигнала от концов линии и представлена одиночным полюсом.

Сигнал  $V_i(t)$  на выходе абонентского тракта может быть представлен выражением:

$$V_i(t) = a_{отр} \times U_i(t) + a_{кл} \times L_{ал} \times U_{i-1}(t) + K_{отр}/2 \times V_{i-j-1}(t) \quad (2.14)$$

где:  $a_{отр}$  - затухание отражения Аб.тракта (дБ);  $a_{кл}$  - километрическое затухание Аб. тракта (дБ/км);  $L_{ал}$  - длина Аб. тракта (км);

$K_{отр}$  - коэффициент отражения.

$$K_{отр} = 10^{-\frac{a_{отр}}{20}}, \quad (2.15)$$

$a$  и  $a_a$  - фильтровые коэффициенты:

$$a = 10^{-\frac{a_{кл} L_{ал}}{20}}, \quad (2.16)$$

$$a_a = \frac{1-a}{2}, \quad (2.17)$$

Задержки в отводах вычисляется по формуле:

$$t_{зад.ал.отр} = 2 \frac{L_{ал}}{v_{ал}}, \quad (2.18)$$

где:  $v_{ал}$  - скорость сигнала в линии.

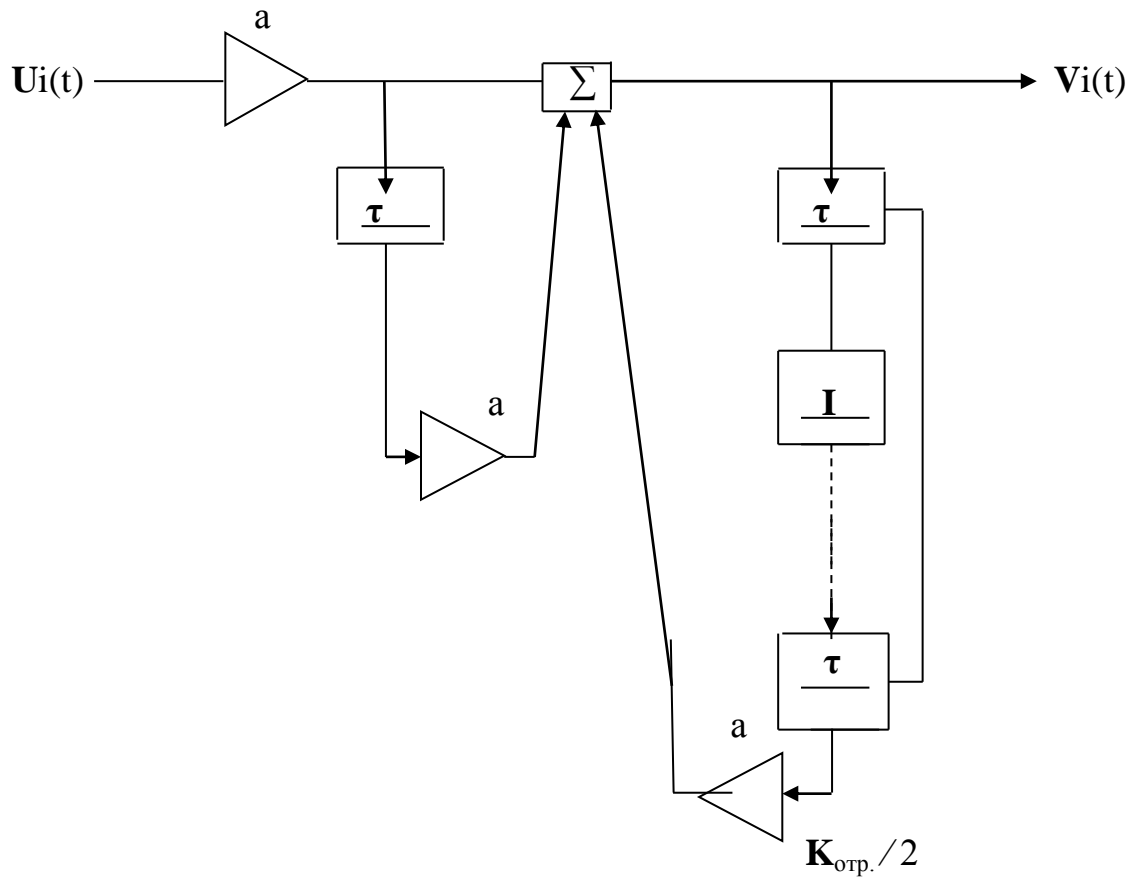


Рис. 2.17. Схема абонентского тракта.

По рекомендации [G.122] величина  $v_{ал}$  составляет  $v_{ал} = 160 \text{ км/мс}$ .

Отсюда вычисляем величину  $j$ :

$$j = \text{INT} \left( \frac{t_{\text{зад.ал.отр}}}{T_d} \right), \quad (2.19)$$

где: INT – операция выделения целого числа;

$T_d = \frac{1}{f_d} = 30 \text{ мкс}$  - период дискретизации.

Подставляем  $t_{\text{зад.ал.отр}} = 2 \frac{L_{ал}}{v_{ал}}$  и получаем:

$$j = \text{INT}\left(2 \frac{L_{ал}}{v_{ал}} f_{\delta}\right) = \text{INT}\left(2 \frac{L_{ал}(\text{км})}{160000(\text{км/с})} 8000\right),$$

или  $j = \text{INT}\left(\frac{4L_{ал}(\text{км})}{10}\right)$  (2.20)

Проведена разработка **источника речевого сигнала** (ИРС), алгоритма предварительной и восстановительной коррекции РС позволяющего восстановить параметры сигнала, определяющие оценку качества передачи абонентом. Коррекция производится путем обработки аналитической огибающей РС. Синтез ортогонального РС для формирования огибающей осуществляется с помощью БПФ:

$$X(k) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} X(n) \cdot \left(\cos \frac{2\pi nk}{N} - j \sin \frac{2\pi nk}{N}\right) \quad (2.21)$$

где **X(k)** – частотный коэффициент;

**N** – длина выборки;

**n** - текущий номер;

**X(n)** – отсчёт исходной дискретной последовательности;

**k** – номер коэффициента.

Изменение знака перед мнимой частью при ОБПФ позволяет синтезировать ортогональный сигнал:

$$X(nort) = \sum_{n=0}^{N-1} X(k) \cdot \left(\cos \frac{2\pi nk}{N} - j \sin \frac{2\pi nk}{N}\right) \quad (2.22)$$

Теперь РС может быть представлен произведением двух функций – огибающей и косинуса фазы:

$$Z(t) = A(t) \cdot \cos \varphi(t) \quad (2.23)$$

где:  $A(t) = \sqrt{Z^2(t) + \bar{Z}^2(t)}$ ,  $\varphi(t) = \text{arctg} \frac{\bar{Z}(t)}{Z(t)}$  (2.24),(2.25)

## **2.8. Программная реализация метода объективной оценки качества передачи РС**

На основе математической модели разрабатывается программная реализация метода объективного контроля качества передачи речевой информации на ЭВМ.

Для разработки программ, работающих с данными реальных речевых сигналов и шумов, целесообразно использовать язык программирования в системе MATLAB.

Язык программирования системы MATLAB является типичным проблемно-ориентированным языком программирования высокого уровня. Точнее говоря, это даже язык сверхвысокого уровня, содержащий сложные операторы и функции, реализация которых на обычных языках (например, Бейсике, Паскале или Си) потребовала бы много усилий и времени. К таким функциям относятся матричные функции (функции быстрого преобразования Фурье (БПФ)) и другие, а к операторам - операторы построения разнообразных графиков, генерации матриц определённого вида и т.д.

### **Разработка алгоритма программы имитационной модели**

На Рис. 2.25. показан логический алгоритм имитационной модели метода объективного контроля качества.



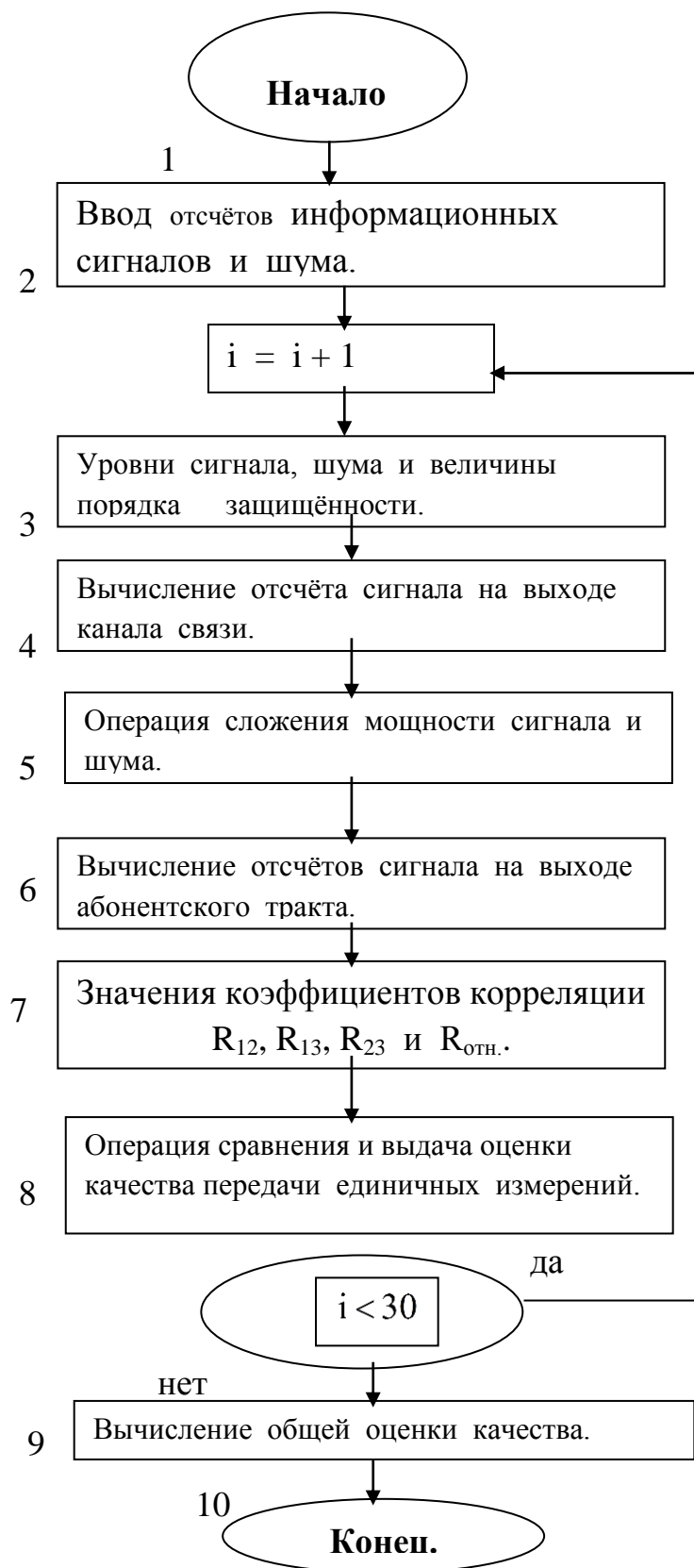


Рис. 2.25. Алгоритм работы имитационной модели.

где:

- блок 1 - начало;
- блок 2 - осуществляет ввод отчетов сигналов РС и шума;
- блок 3 - вычисляет уровня сигнала, уровня шума и значения защищённости;
- блок 4 - вычисляет отсчёт сигнала на выходе канала связи;
- блок 5 - осуществляет подмешивание шума к речевому сигналу;
- блок 6 - вычисляет отчеты сигнала на выходе абонентского тракта;
- блок 7 - вычисляет значения коэффициентов корреляции  $R_{12}$ ,  $R_{13}$ ,  $R_{23}$  и  $R_{отн.}$ ;
- блок 8 - выполняет операцию сравнения и выдает оценку качества передачи единичных измерений;
- блок 9 - вычисляет общую оценку качества;
- блок 10 – конец.

### Разработка программы имитационной модели

Текст программы показан в ПРИЛОЖЕНИИ-1.

В начале вводятся следующие переменные:

- пороговые значения сигнала, поступающего из блока ИРС;

Таблица 2.5.

К <sub>гр.</sub> , К <sub>разб.</sub> , К <sub>нат.</sub>	P <sub>р.с</sub> (дБ) в точках				Сиг./Шум A <sub>защ.</sub>	R
	0 дБ	- 13 дБ	+4 дБ	-3,5дБ	(дБ)	
Оценка в баллах						
0	$P_{р.с} \leq P_{ш}$	$P_{р.с} \leq P_{ш}$	$P_{р.с} \leq P_{ш}$	$P_{р.с} \leq P_{ш}$	$A_{защ.} < 0$	$R < 0.2$
1	- 34	- 47	- 30	- 37,5	$A_{защ.} \geq 0$	$R \geq 0.2$
2	- 25,2	- 38,2	- 21,2	- 28,7	$A_{защ.} \geq 10$	$R \geq 0.3$
3	- 16,6	- 29,6	- 12,6	- 20,1	$A_{защ.} \geq 20$	$R \geq 0.5$
4	- 2,6	- 15,6	+ 1,4	- 6,1	$A_{защ.} \geq 30$	$R \geq 0.8$

- параметры канала связи (40 значений коэффициентов  $g$ );
- параметры абонентского тракта (удельное километрическое затухание в дБ/км; длина в км; затухание отражения Аб.тракта в дБ);

Ниже приведены порядок и основные соотношения для расчета:

- вычисление мощностей РС и шума:

$$P_X = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} ; \quad P_\xi = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\xi_i - \bar{\xi})^2} ; \quad (2.26)$$

- вычисление отношения сигнал/шум:

$$C/Ш = 10 \log \left( \frac{P_X}{P_\xi} \right); \quad (2.27)$$

- вычисление сигнала на выходе канала связи:

$$Y_i = \sum_{j=0}^{N-1} X_{i-j} \times g_j, \quad j = 0 \dots N-1 .$$

- вычисление сигнала на входе абонентского тракта:

$$U_i = Y_i + \xi_i;$$

- вычисление сигнала на выходе абонентского тракта

$$V_i(t) = a_{отр} \times U_i(t) + a_{квл} \times L_{ал} \times U_{i-1}(t) + K_{отр}/2 \times V_{i-j-1}(t);$$

- вычисление коэффициентов корреляции между огибающими и значением  $R_{отн.}$ :

$$R_{отн.} = \frac{1}{3} \left( \frac{R_{12}}{Ro_{12}} + \frac{R_{13}}{Ro_{13}} + \frac{R_{23}}{Ro_{23}} \right),$$

где:  $Ro_{12} = 0.58$  ;  $Ro_{13} = 0.28$  ;  $Ro_{23} = 0.40$  ;

- вычисление  $K_{гром.}$  ,  $K_{разб.}$  ,  $K_{натур.}$  по пороговым значениям;
- **вычисление интегральной оценки:**

$$K_{интегр} = 3 \cdot \sqrt[3]{A_{2p} \cdot A_{разб} \cdot A_{натур}}$$

- вычисление общей оценки качества передачи 30-и измерений:

$$K_{\text{общ}} = \frac{1}{30} \sum_{i=1}^{30} K_{\text{интегр.}i} .$$

**Выводы:**

1. При рассмотрении вариантов размещения УК и их анализе определён основной (*второй*) вариант.
2. Разработаны математические модели УК для речевой информации.
3. Разработаны математические аппараты для вычисления основных составляющих интегрального коэффициента качества передачи

РС:

- коэффициента громкости;
- коэффициента разборчивости;
- коэффициента натуральности.

# ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ОБЪЕКТИВНОЙ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ПЕРЕДАЧИ РЕЧЕВОГО СИГНАЛА И СОЗДАНИЕ УСТРОЙСТВА КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА И ЕГО ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

## 3.1. Критерии эффективности объективной оценки качества передачи речи при различных методах контроля

- Объективные методы, в которых контролируются изменение формы гармонических колебаний звуковых частот (ГОСТ). Современные аналоговые и цифровые каналы не сохраняют формы РС, но обеспечивают субъективно высокое качество передачи.

- Психоакустические оценки использующие алгоритм слухового восприятия человека, рекомендация ITU-RBS.1387. Оценка формируется по отрезкам реальных сигналов, но точность невысока, что определяется используемой моделью восприятия РС и низкой точностью спектрального анализа.

- Субъективно-статистические испытания, которые остаются единственным, весьма трудоемким, методом оценки качества передачи по адаптивным каналам. В работе данный метод для оценки качества передачи РС использован разработанный кафедрой ТиЗВ, МТУСИ способ оценки качества передачи по изменению статистических распределений параметров вещательного сигнала:

- энергетических параметров (относительная средняя мощность – ОСМ):
  - параметров формы (фронты огибающей сигнала – ФОС);
  - спектральных параметров (мгновенные амплитудные спектры – МАС).

ОСМс определяется как отношение мощности сигнала на интервале

анализа (200 мс) к мощности синусоиды с амплитудой, равной максимальному мгновенному значению сигнала, на интервале анализа, или значению, номинальному для канала, ОСМк.

### 3.2. Алгоритм формирования оценки ОСМ

Алгоритм формирования оценки ОСМ предполагает проведение следующих операций для искаженного и исходного сигналов:

- сегментацию сигнала на интервалы требуемой длительности  $T$ ;
- вычисления на каждом из интервалов ОСМ;
- разбиение диапазона значений ИОСМ на  $N$  интервалов;
- подсчет статистических частот ИОСМ в каждом из  $N$

интервалов;

- расчёт оценок математического ожидания, СКО и медианы.

На последнем этапе производится сравнение статистических характеристик ИОСМ для обработанного и исходного сигналов, результаты оценки статистических распределений приведены на Рис.1а,б. Формирование оценок параметров формы, спектра и кепстра, производится аналогично.

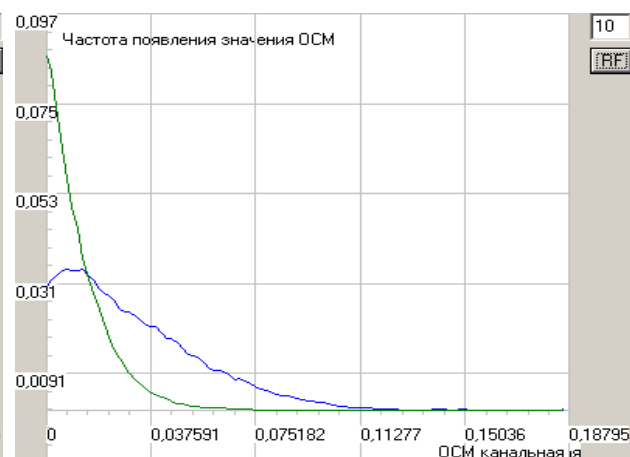
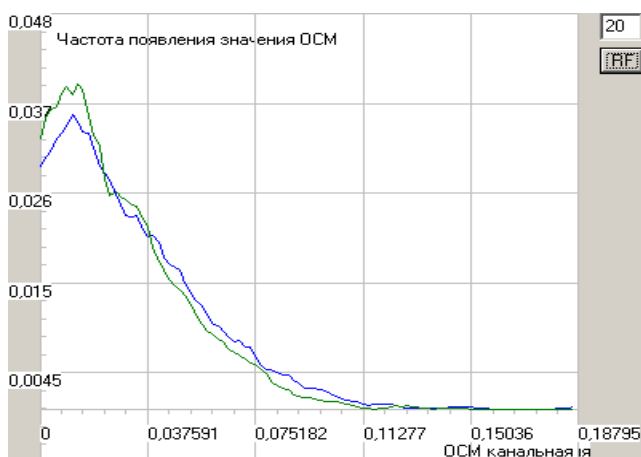


Рис.1а Распределение ОСМк исходного РС и переданного по каналу со скоростью передачи 8 кбит/с.  
Рис.1б. Распределение ОСМк исходного РС и переданного по каналу со скоростью передачи 4,8 кбит/с.

### 3.3. Исследование искажений при многократном кодировании РС

На Рис. 2. приведены результаты сопоставления оценок ОСМк РС и качества передачи по шкале MOS, подтверждающий возможность прогнозирования качества передачи по медианному значению ОСМк.

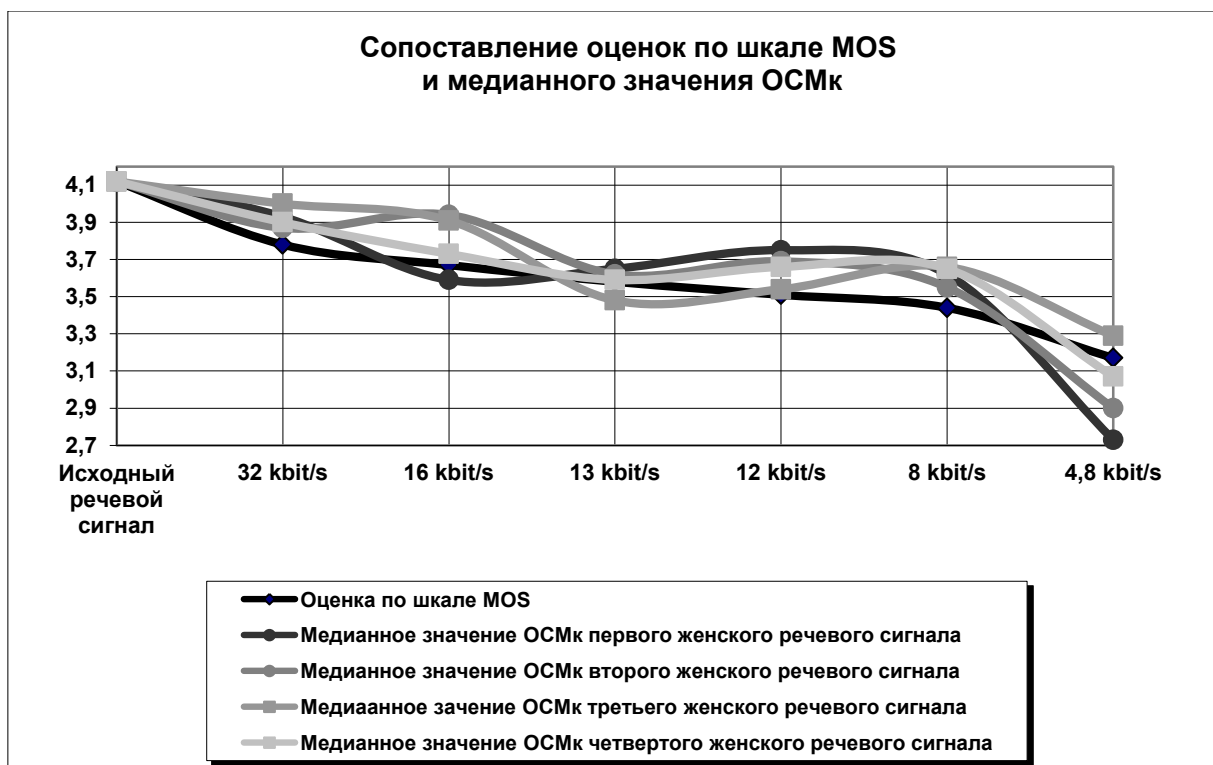
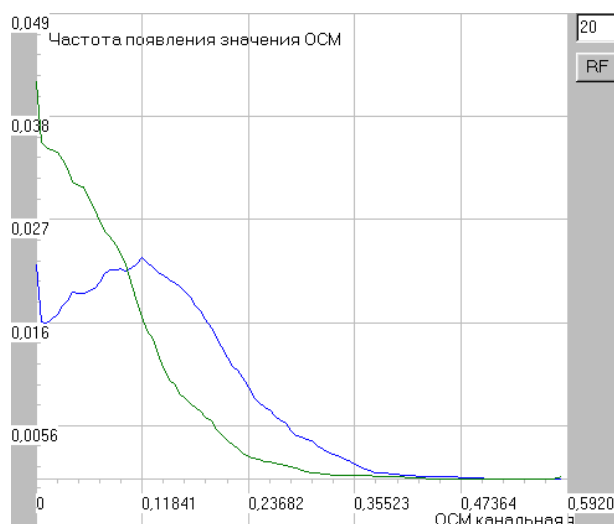
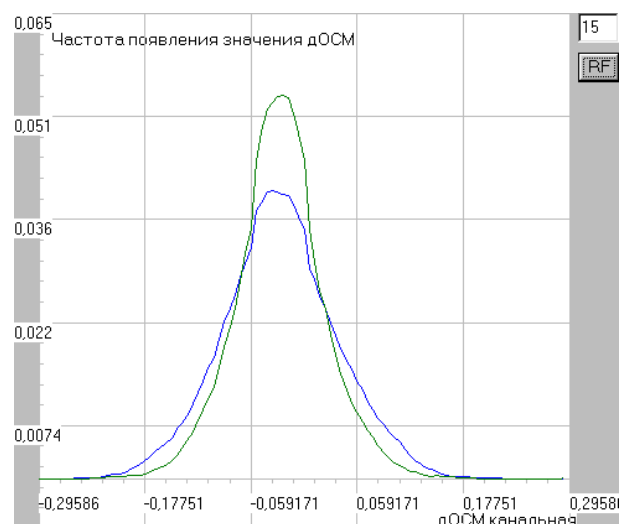


Рис. 2. Сопоставление оценок по шкале MOS и медианного значений ОСМк.

В реальной сети сигнал обрабатывается последовательно несколькими, кодеками, например, при разговоре двух абонентов мобильных сетей DAMPS и GSM при прохождении сигнала через региональную АТС, V-CELP, АДИКМ, RPE-LTP. Рассмотрим изменение ОСМк и дОСМк в комбинации из трех кодеков со скоростями 4,8 кбит/с, 32 кбит/с и 13 кбит/с, Рис. 3а,б.



**Рис. 3а.** Распределения ОСМк РС до и после трех кодеков (4,8-32-13 кбит/с).



**Рис. 3б.** Распределения дОСМк РС до и после трех кодеков (4,8-32-13 кбит/с).

Результаты оценки ОСМк для различных сочетаний кодеков приведены в таблице 1. Исследование ОСМ для РС прошедшего обработку несколькими кодеками показало, что качество определяется низкоскоростным кодеком.

Таблица 1. Изменение параметров канальной ОСМ.

Комбинации кодеков	Канальная ОСМ			
	Среднее значение	Значение СКО	Медианное значение	Интегральное отклонение
Исходный сигнал	0,14	0,0966	0,132	0
4,8 – 32 - 13	0,117	0,0513	0,111	0,355
12 – 16 - 13	0,129	0,0574	0,125	0,155
13 – 4,8 – 16	0,119	0,0551	0,111	0,324
8 – 13 – 4,8	0,12	0,0563	0,112	0,314
4,8 – 13 - 8	0,115	0,0559	0,11	0,298



Учитывая, что конечным приемником речевой информации в канале связи обычно является слуховой аппарат человека, который осуществляет восприятие речи, считается целесообразным оценивать качество передачи речи “искусственным ухом”, характеристики которого должны совпадать с основными характеристиками естественного уха [25]. Сопоставление реальных параметров речевого сигнала, передаваемого по каналу мобильной связи с эталонными значениями, помещёнными в “искусственном ухе”, даёт возможность сделать оценку качества с требуемой точностью. С целью автоматизации процесса контроля качества передачи речевой информации по каналам связи, “искусственное ухо” должно оценивать не акустический, а электрический входной сигнал (первичный сигнал). Поэтому в данной работе будем “искусственное ухо” называть электронным.

Как известно, слуховой аппарат человека представляет собой комплексное анализирующее устройство, работающее как частотный, временной и пространственный анализатор звуков, разлагающий звук на составляющие и формирующий в мозгу нужную звуковую картину. Этот анализатор разделен на две части - периферическую, состоящую из наружного, среднего и внутреннего уха, и центральную, в которую входят слуховые нервы и два слуховых центра (правый и левый) головного мозга. Периферическая часть выполняет роль приемника и амплитудно-частотного анализатора. Центральная часть выполняет временной и пространственный анализы и синтезирует результирующий слуховой образ.

“Электронное ухо” представляет собой совокупность частотных фильтров, усилителей, генераторов эталонных сигналов, компараторов накопителей и ряда вспомогательных устройств. Необходимо, чтобы чувствительность “электронного уха” совпадала с чувствительностью естественного.

Порог слышимости является одной из основных характеристик естественного уха. На малых уровнях совокупность слышимых тонов ограничена порогом слышимости, а на больших - болевым порогом. Область между этими двумя границами называются плоскостью слышимости. Плоскость слышимости простирается от 20 Гц до 20 кГц и от 0 до 130 дБ. Изобразим графически на Рис.3.1 [3] граничные области слухового восприятия в зависимости от частоты и уровня интенсивности (звукового давления). Нижняя граница – порог слышимости; верхняя граница – болевой порог.

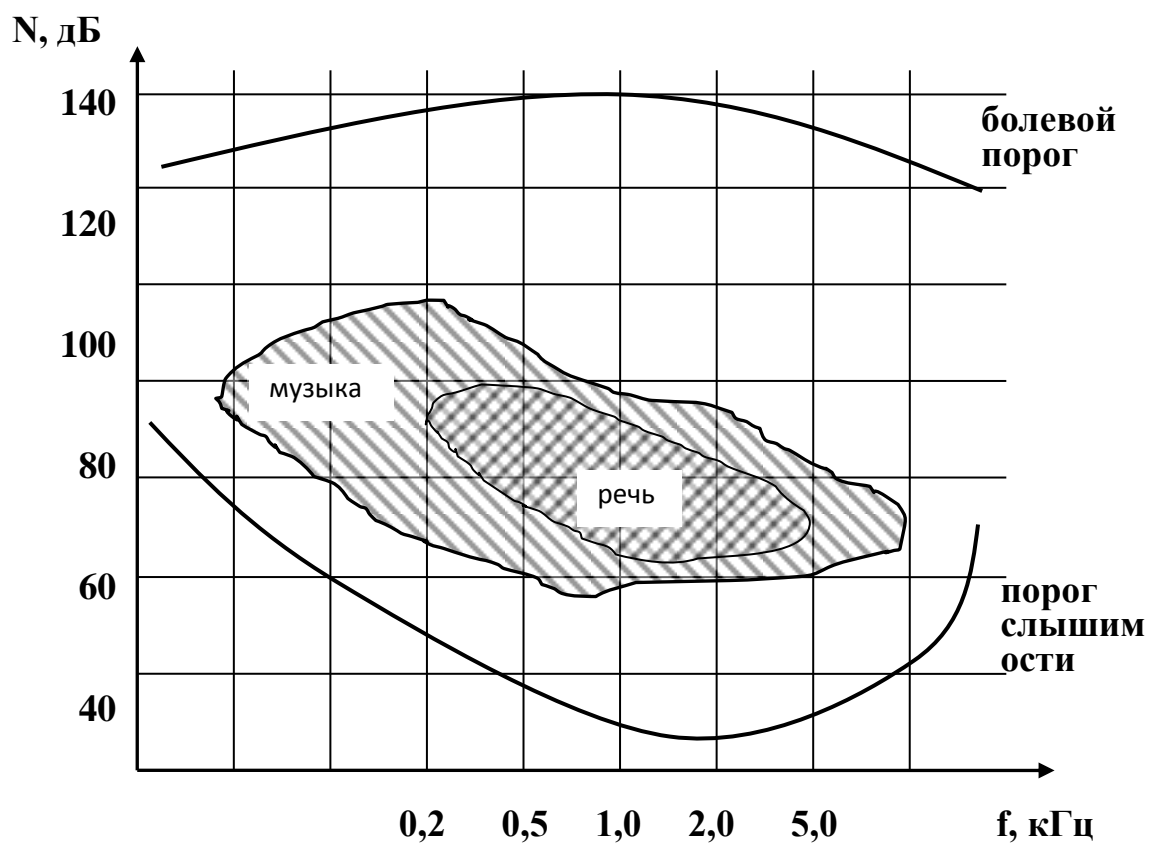


Рис.3.1. Граничные области слухового восприятия.

Доказано, что ухо обладает повышенной механической чувствительностью к некоторым частотным составляющим сигнала и пониженной - к другим. Подобная частотная зависимость определяется

субъективно. В какой-то степени изменения порога слышимости могут быть объяснены просто изменением механической чувствительности уха. Поэтому при мобильной связи равные мощности сигнала и помехи различной частоты оказывают различное влияние на качество связи вследствие частотной зависимости чувствительности уха. Следовательно, чувствительность “искусственного уха” должна совпадать с чувствительностью естественного уха.

В Таблице 3.1 и на Рис. 3.2 приведена частотная характеристика чувствительности уха.

Таблица 3.1. Частотная характеристика чувствительности уха.

Частота, кГц	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0	1,6	2,0	2,1	2,4	3,0	3,4
Чувствительность, дБ	-20	-13	-9	-4	-2	0	2	2,5	2,6	3	4	7

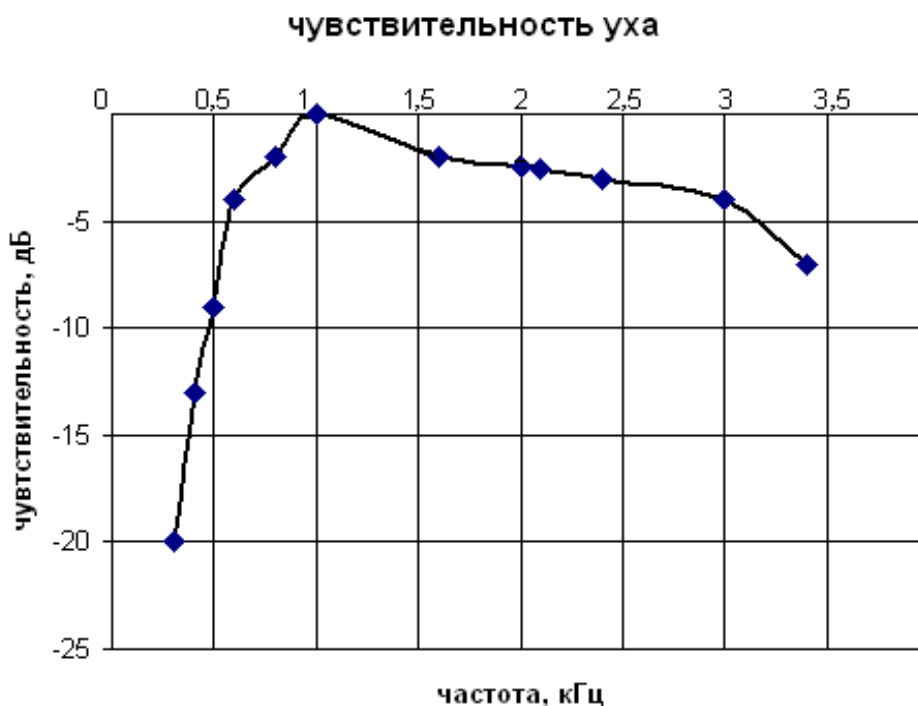


Рис.3.2. Частотная характеристика чувствительности уха.

Помеха на выходе канала оценивается не действующим напряжением, а так называемым взвешенным или психофотметрическим. Психофотметрическое напряжение помехи измеряется психофотметром, представляющим собой электронный вольтметр с квадратичной шкалой, на входе которого включён взвешивающий контур с частотной характеристикой, имитирующей частотную характеристику чувствительности уха. Частотная характеристика относительной чувствительности уха и психофотметра, рекомендованная МСЭ-Т, приведена в Таблице 3.2 [33].

Таблица 3.2. Частотная характеристика относительной чувствительности психофотметра.

Частота кГц	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0
Псоф. Чувствительность дБ	- 13	- 5,2	- 3,9	- 2,6	0	+1,6
Частота кГц	1,6	2,0	2,1	2,4	3,0	3,4
Псоф. Чувствительность дБ	- 0,5	- 1,8	- 2,4	- 4	-7,4	-11,4

В соответствии с приведёнными выше положениями, главным условием практической применимости предлагаемой методики является наличие устройства, обеспечивающего возможность взаимного отличия речевых сигналов, отражённых сигналов и других видов шумов, и измерение энергетических характеристик каждого из этих факторов на фоне мешающего воздействия остальных с применяемой степенью достоверности. Традиционно решение подобных задач осуществляется с помощью устройств, получивших название детекторов речи. Эти устройства используются во многих приложениях - статистических системах уплотнения (передачи), эхоподавляющих устройствах и др. Степень достоверности

обнаружения определяется алгоритмом распознавания, заложенным в детекторе речи.

Наиболее распространённым типом детектора речи является пороговый детектор, использующий уровень взвешенного сигнала в качестве критерия отличия речевого сигнала от эхосигнала и шума. Этот принцип распознавания обеспечивает невысокую достоверность, причем как по характеристике ложного срабатывания (особенно на импульсных помехах), так и по пропуску речевого сигнала.

Использование порогового детектора в классической трактовке в предлагаемой системе оценки качества затруднительно. Это связано в первую очередь с тем, что в процессе измерений вследствие неточности оценки состояния активности канала будет иметь место значительное влияние речевого сигнала на результаты измерения уровня шума и наоборот. Так, перед действием и последствием сигнала сонорных звуков, имеющие большую временную протяженность, будут приводить к значительным погрешностям измерения шума в сравнительно коротких паузах и на краях длинных.

Значительно более высокой достоверностью обнаружения обладает корреляционный принцип распознавания речи, использующий в качестве признака отличия речи от шума наличие корреляции между огибающими сигналов в неперекрывающихся частотных полосах.

Использование корреляционного принципа обнаружения в рамках предлагаемой методики имеет еще один важный аспект - возможность различения остаточного эхосигнала на фоне шумов и речевого сигнала ближнего по отношению к устройству абонента. Резюмируя приведенные положения, представляется целесообразным сделать следующие выводы. Предлагаемая методика объективной оценки качества передачи речевой информации по каналам мобильной связи, базирующаяся на основе понятия эквивалентного по мешающему воздействию уровня шума, позволяет адекватно оценить интегральное мешающее воздействие основных для

телефонного канала мобильной связи факторов. Практическая реализация предлагаемой методики возможна при использовании корреляционного принципа обнаружения речевых сигналов на фоне шумов, позволяющего дифференцировать вклад в интегральную объективную оценку качества передачи основных мешающих факторов и оценить общее качество передачи с учётом степени субъективного мешающего воздействия этих факторов.

### **3.4. Изменения энергетических характеристик речевого сигнала до и после обработки его кодеками с различной степенью сжатия**

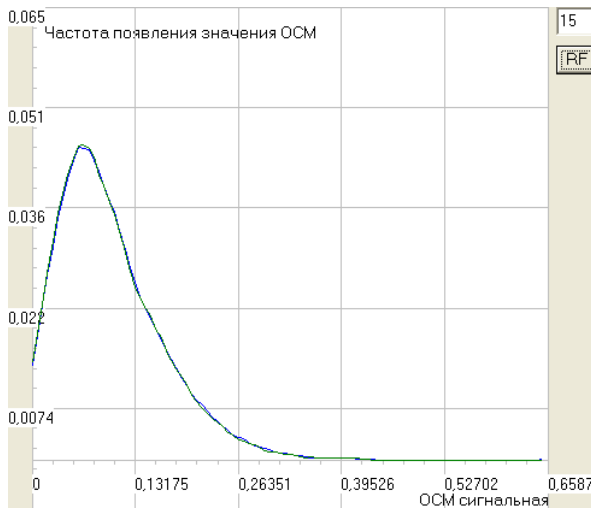
Исследованию подлежат мужской и женский речевые сигналы, прошедшие обработку, характерную для современных СПРС – сжатие объема сигнала кодеками с различной цифровой скоростью (от 32 кбит/с до 4,8 кбит/с).

Единственным методом оценки качества передачи в таких системах остаются ССИ. Процедура весьма трудоемкая, длительная и дорогая, но при тщательном выполнении обеспечивающая достаточно точную оценку. В настоящее время ССИ проводятся, в основном, самими разработчиками алгоритмов обработки и представления речевого сигнала, что не всегда гарантирует от неосознанного субъективизма при обработке и интерпретации их результатов.

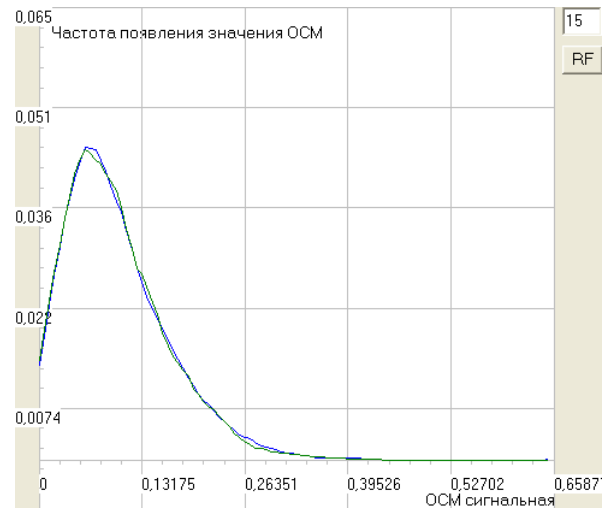
**Таким образом, актуальность задачи объективизации контроля качества передачи речевых сигналов является очевидной. Так как, по существу, субъективная оценка качества речи является интегральной, то логично предположить, что она связана с интегральными статистическими распределениями параметров речевого сигнала, определяющими энергетические (громкостные), динамические свойства сигнала. Исследуя энергетические параметры РС, прошедшего сжатие кодеками с различной цифровой скоростью, выясним связь их изменений с заметностью искажений сигнала.**

Изменения распределений энергетических параметров речевых сигналов хорошо заметны на графиках, приведенных ниже на Рис.3.1.1-3.1.48.. На этих рисунках синяя линия – исходный сигнал, зеленая – обработанный.

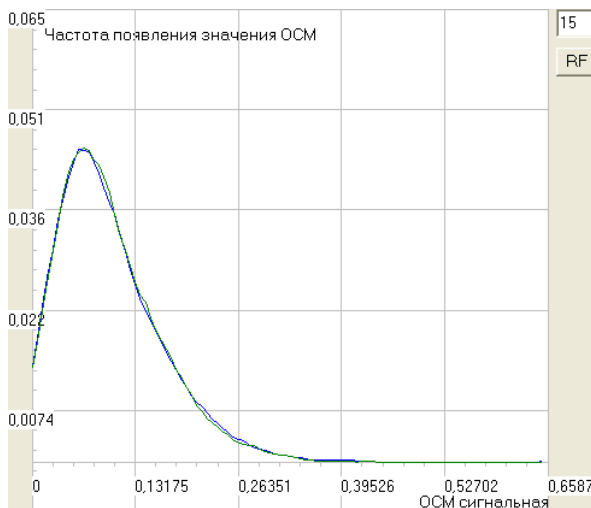
Изменение распределения **сигнальной ОСМ** мужского речевого сигнала:



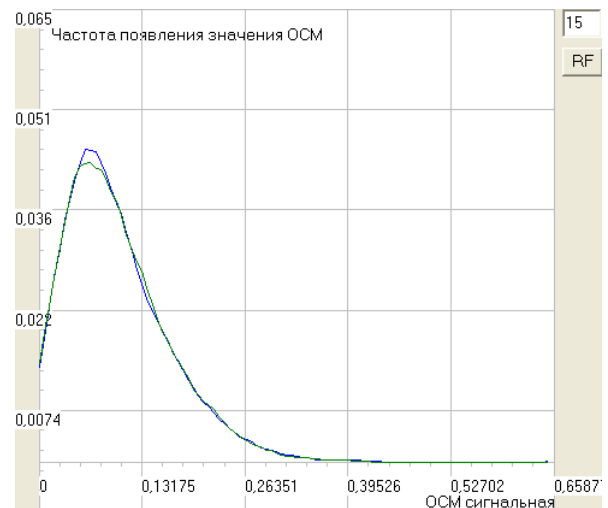
**Рис. 3.1.1.** Распределения ОСМс мужского речевого сигнала до и после обработки кодеком с цифровой скоростью 32 кбит/с



**Рис. 3.1.2.** Распределения ОСМс мужского речевого сигнала до и после обработки кодеком с цифровой скоростью 16 кбит/с

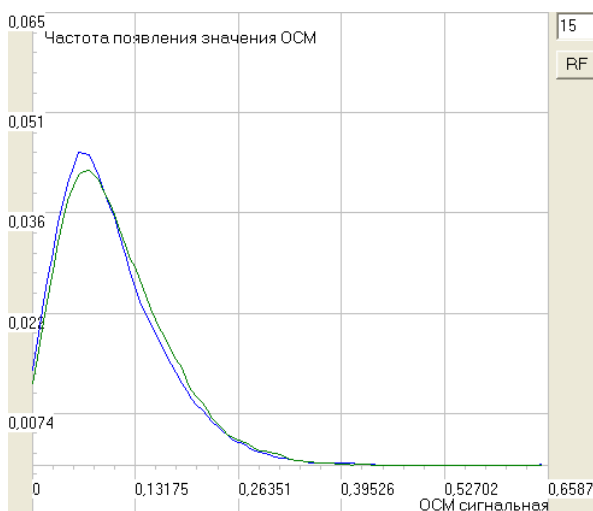


**Рис. 3.1.3.** Распределения ОСМс мужского речевого сигнала до и после обработки кодеком с



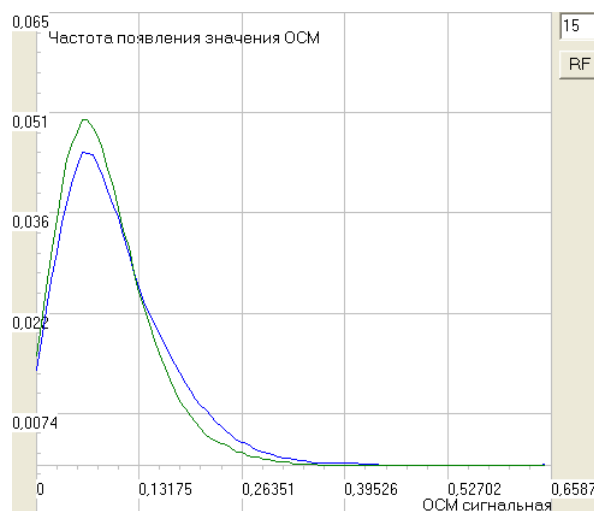
**Рис. 3.1.4.** Распределения ОСМс мужского речевого сигнала до и после обработки кодеком с

цифровой скоростью 13 кбит/с



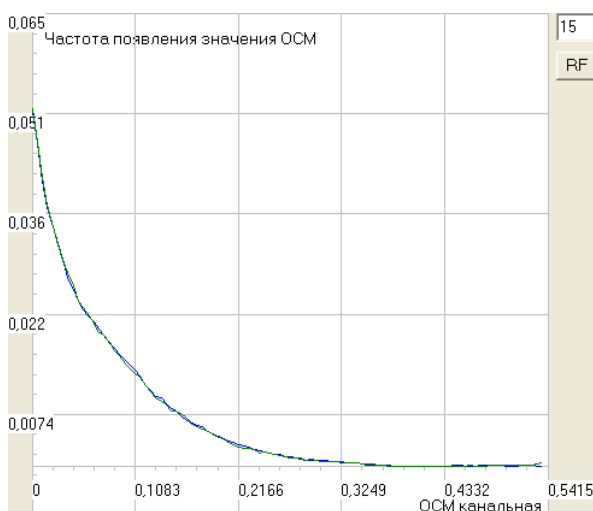
**Рис. 3.1.5.** Распределения OSMс мужского речевого сигнала до и после обработки кодеком с цифровой скоростью 8 кбит/с

цифровой скоростью 12 кбит/с

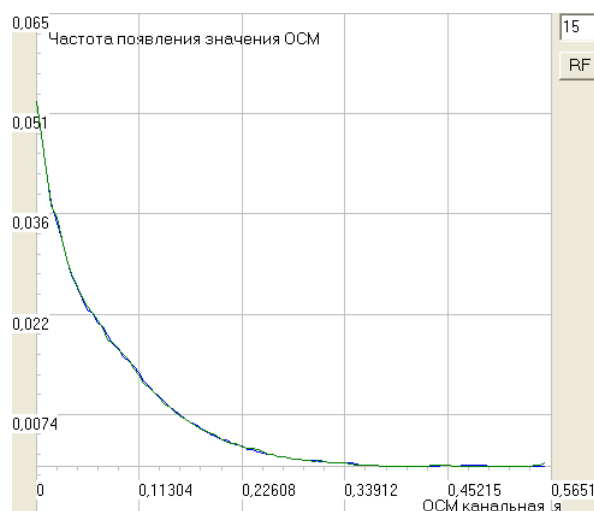


**Рис.3.1.6.** Распределения OSMс мужского речевого сигнала до и после обработки кодеком с цифровой скоростью 4,8 кбит/с

Изменение распределения **канальной OSM** мужского речевого сигнала:



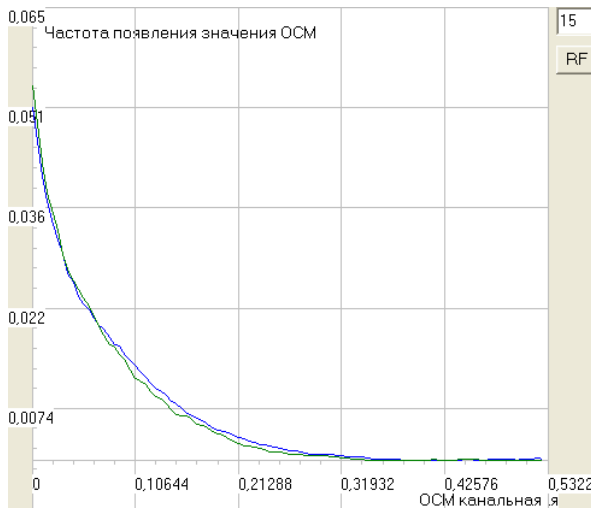
**Рис. 3.1.7.** Распределения OSMк мужского речевого сигнала до и после обработки кодеком с



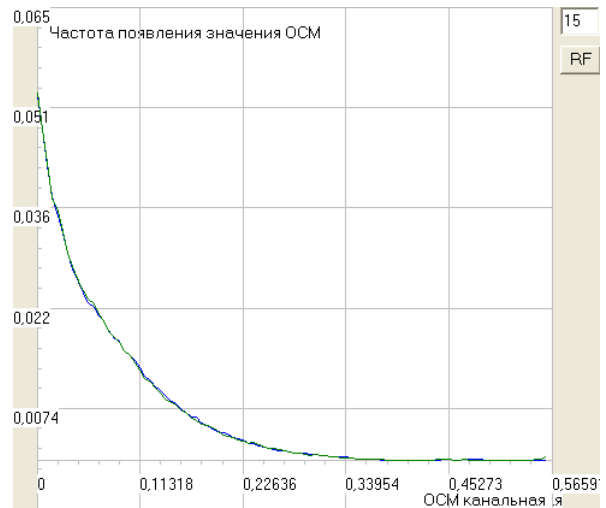
**Рис. 3.1.8.** Распределения OSMк мужского речевого сигнала до и после обработки кодеком с



цифровой скоростью 32 кбит/с

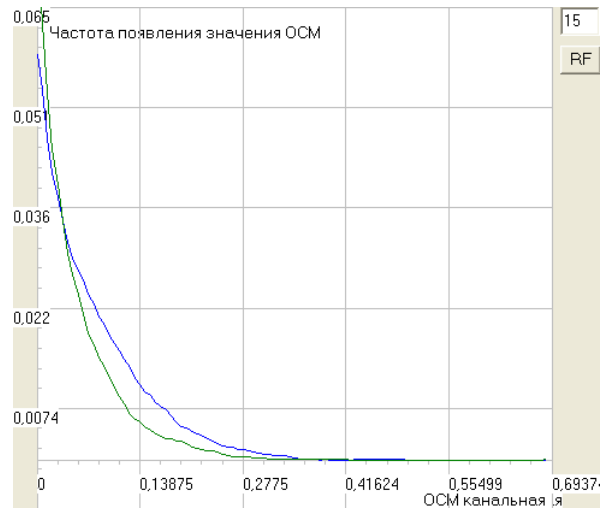
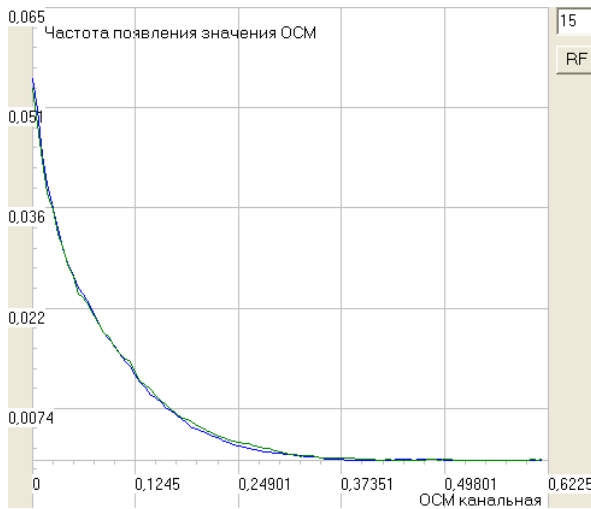


цифровой скоростью 16 кбит/с



**Рис. 3.1.9.** Распределения ОСМк мужского речевого сигнала до и после обработки кодеком с цифровой скоростью 13 кбит/с

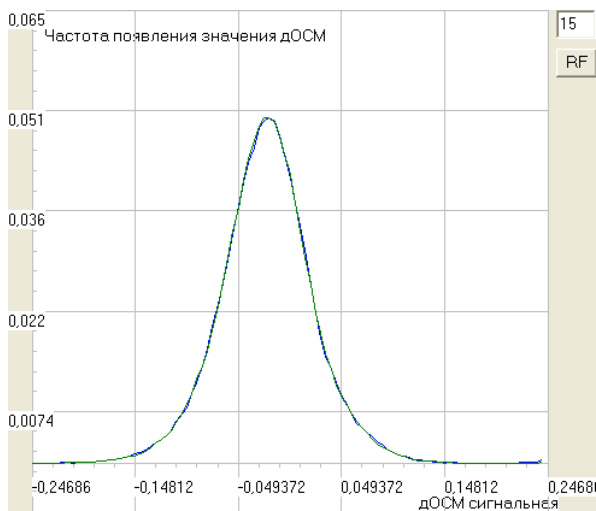
**Рис. 3.1.10.** Распределения ОСМк мужского речевого сигнала до и после обработки кодеком с цифровой скоростью 12 кбит/с



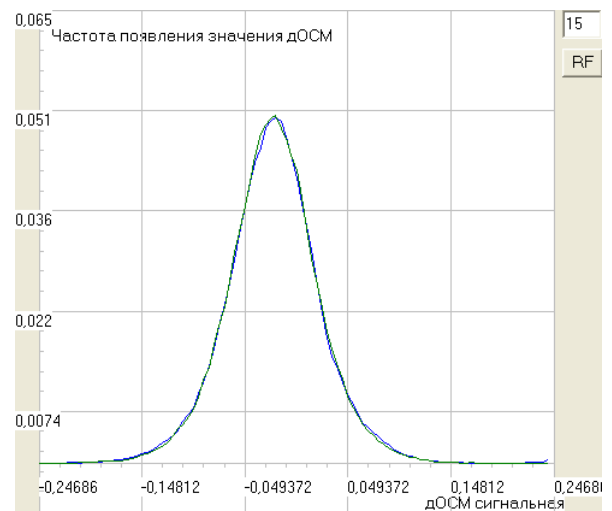
**Рис. 3.1.11.** Распределения ОСМк мужского речевого сигнала до и после обработки кодеком с цифровой скоростью 8 кбит/с

**Рис. 3.1.12.** Распределения ОСМк мужского речевого сигнала до и после обработки кодеком с цифровой скоростью 4,8 кбит/с

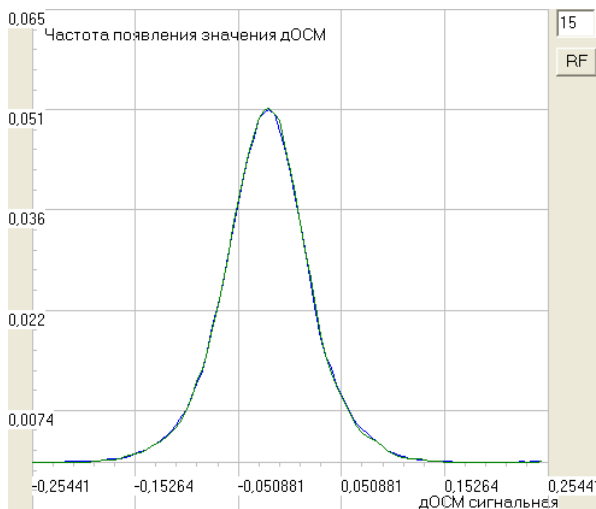
Изменение распределения **дифференциальных сигнальных ОСМ** мужского речевого сигнала:



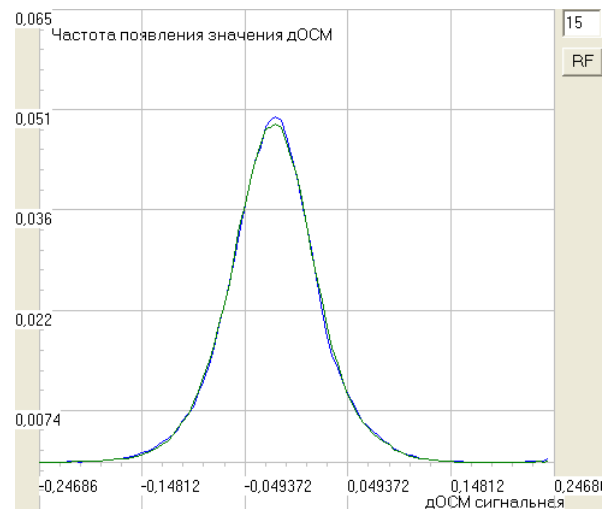
**Рис. 3.1.13.** Распределения дОСМс мужского речевого сигнала до и после обработки кодеком с цифровой скоростью 32 кбит/с



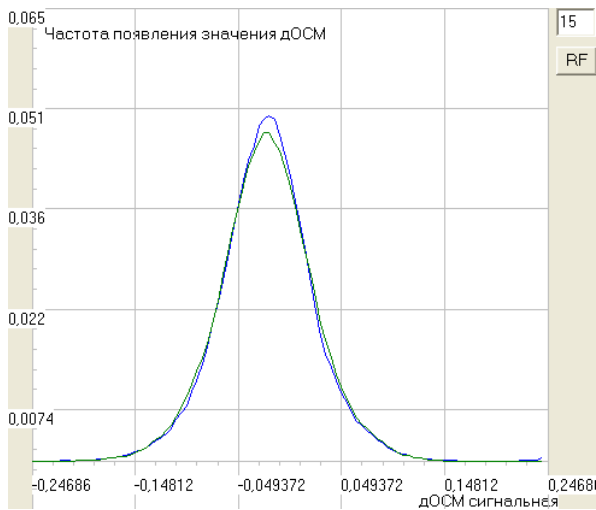
**Рис. 3.1.14.** Распределения дОСМс мужского речевого сигнала до и после обработки кодеком с цифровой скоростью 16 кбит/с



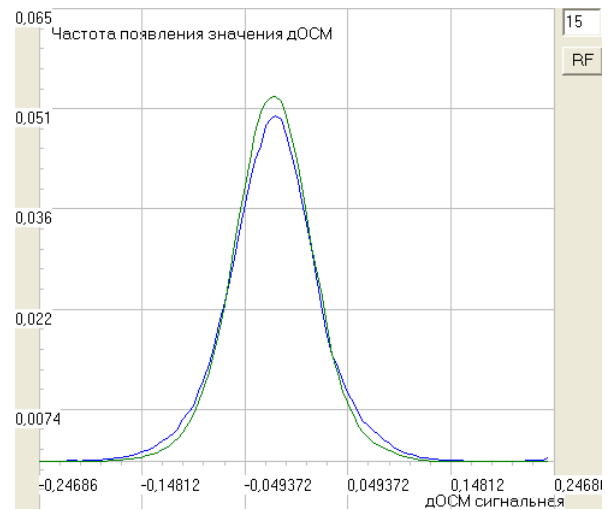
**Рис. 3.1.15.** Распределения дОСМс мужского речевого сигнала до и после обработки кодеком с цифровой скоростью 13 кбит/с



**Рис. 3.1.16.** Распределения дОСМс мужского речевого сигнала до и после обработки кодеком с цифровой скоростью 12 кбит/с

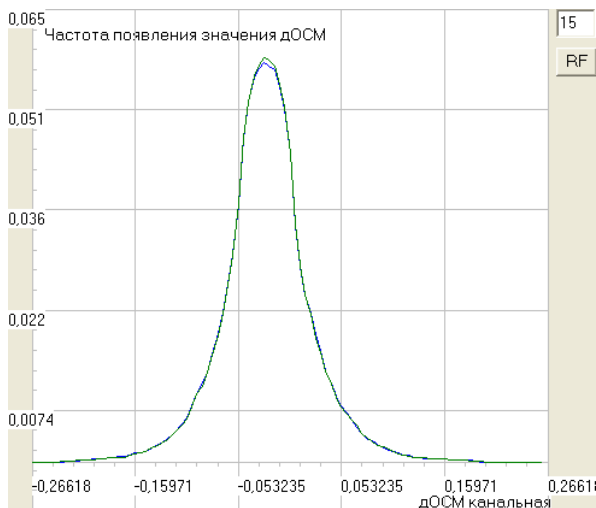


**Рис. 3.1.17.** Распределения дОСМс мужского речевого сигнала до и после обработки кодеком с цифровой скоростью 8 кбит/с

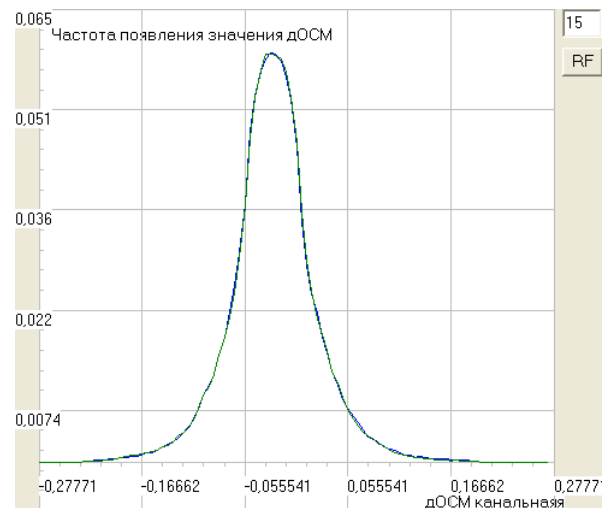


**Рис. 3.1.18.** Распределения дОСМс мужского речевого сигнала до и после обработки кодеком с цифровой скоростью 4,8 кбит/с

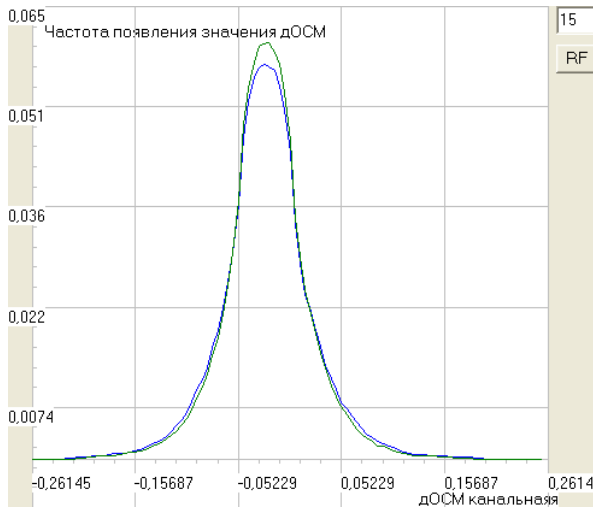
Изменение распределения **дифференциальных канальных ОСМ** мужского речевого сигнала:



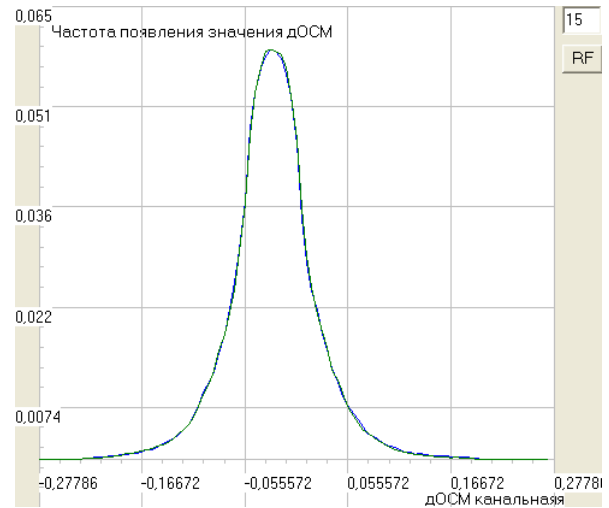
**Рис. 3.1.19.** Распределения дОСМк мужского речевого сигнала до и после обработки кодеком с цифровой скоростью 32 кбит/с



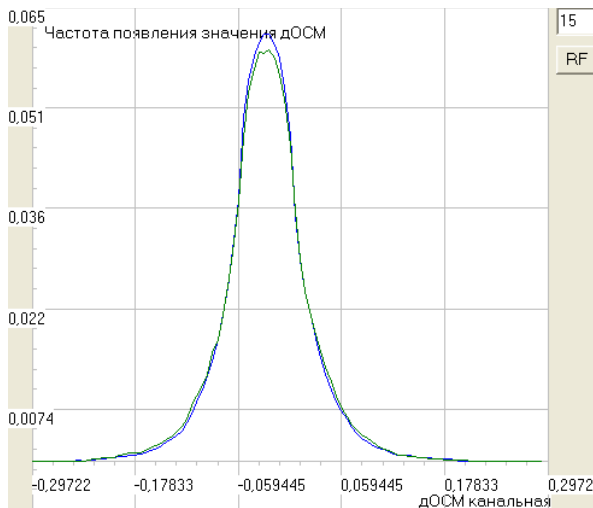
**Рис.3.1.20.** Распределения дОСМк мужского речевого сигнала до и после обработки кодеком с цифровой скоростью 16 кбит/с



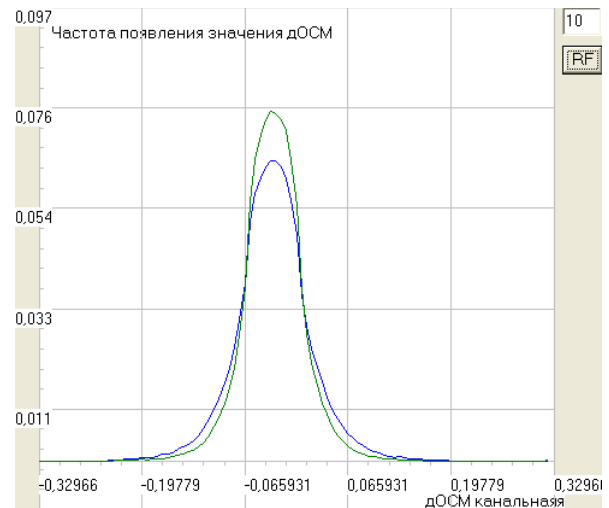
**Рис. 3.1.21.** Распределения ДОСМк мужского речевого сигнала до и после обработки кодеком с цифровой скоростью 13 кбит/с



**Рис. 3.1.22.** Распределения ДОСМк мужского речевого сигнала до и после обработки кодеком с цифровой скоростью 12 кбит/с

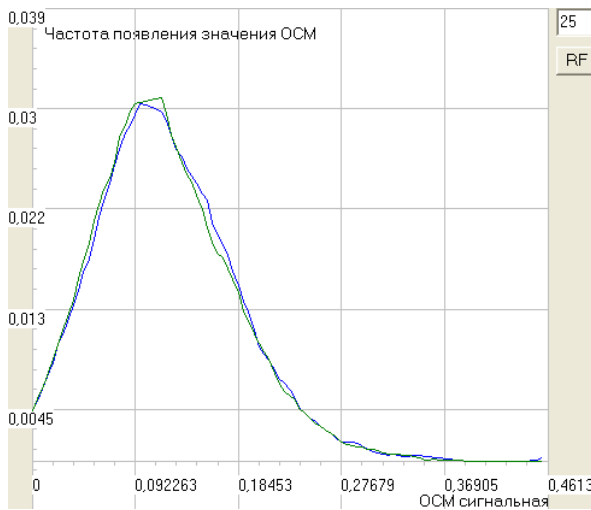


**Рис. 3.1.23..** Распределения ДОСМк мужского речевого сигнала до и после обработки кодеком с цифровой скоростью 8 кбит/с

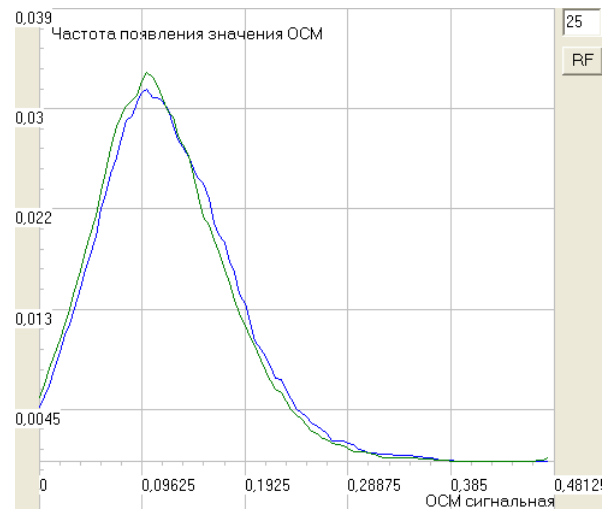


**Рис. 3.1.24.** Распределения ДОСМк мужского речевого сигнала до и после обработки кодеком с цифровой скоростью 4,8 кбит/с

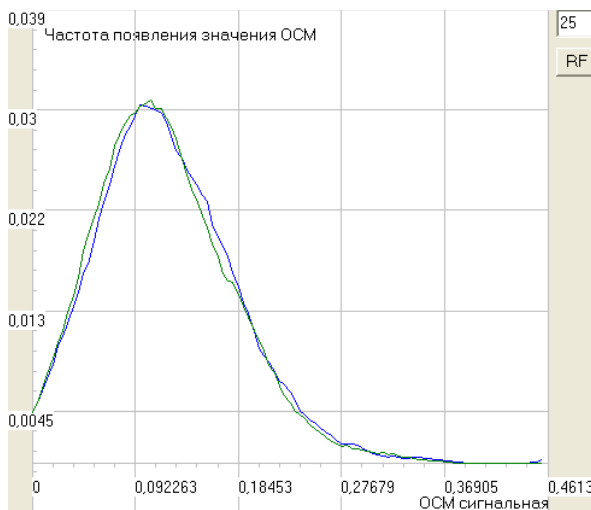
Изменение распределения *сигнальной ОСМ* женского речевого сигнала:



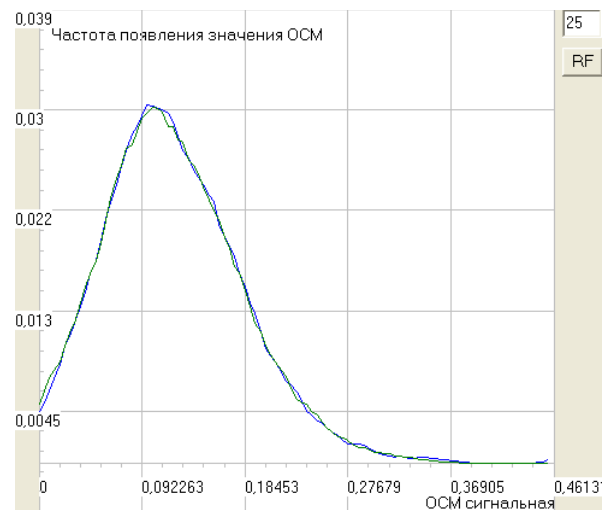
**Рис. 3.1.25.** Распределения OSMс женского речевого сигнала до и после обработки кодеком с цифровой скоростью 32 кбит/с



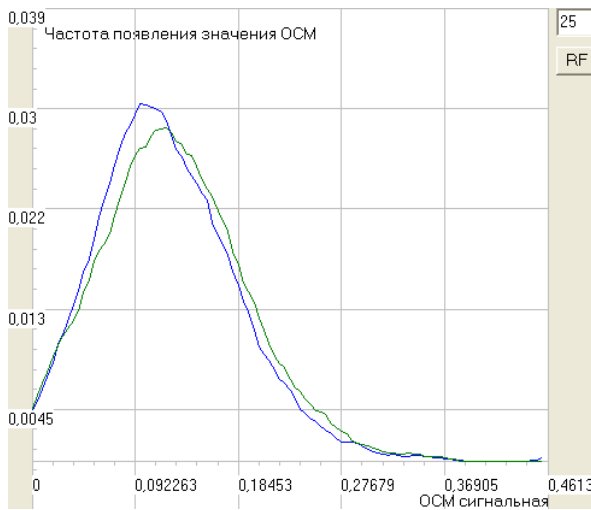
**Рис. 3.1.26.** Распределения OSMс женского речевого сигнала до и после обработки кодеком с цифровой скоростью 16 кбит/с



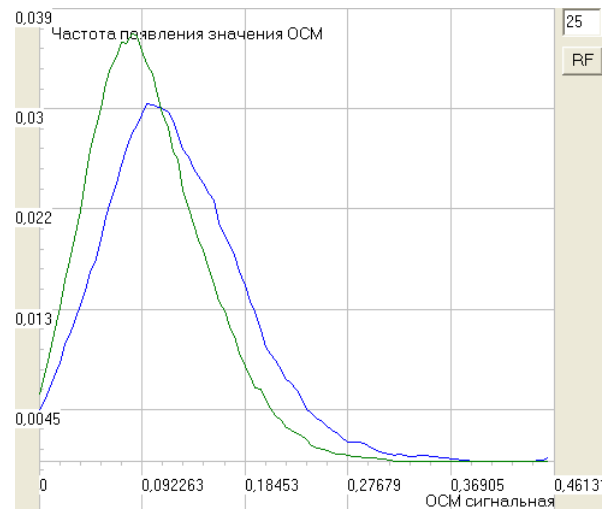
**Рис.3.1.27.** Распределения OSMс женского речевого сигнала до и после обработки кодеком с цифровой скоростью 13 кбит/с



**Рис. 3.1.28.** Распределения OSMс женского речевого сигнала до и после обработки кодеком с цифровой скоростью 12 кбит/с

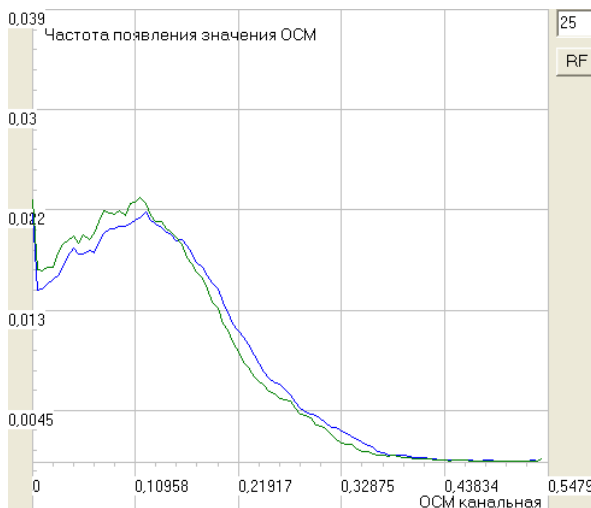


**Рис. 3.1.29.** Распределения ОСМс женского речевого сигнала до и после обработки кодеком с цифровой скоростью 8 кбит/с

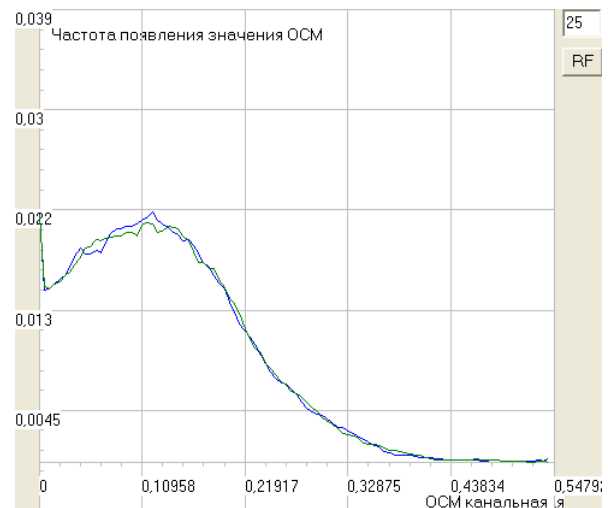


**Рис. 3.1.30.** Распределения ОСМс женского речевого сигнала до и после обработки кодеком с цифровой скоростью 4,8 кбит/с

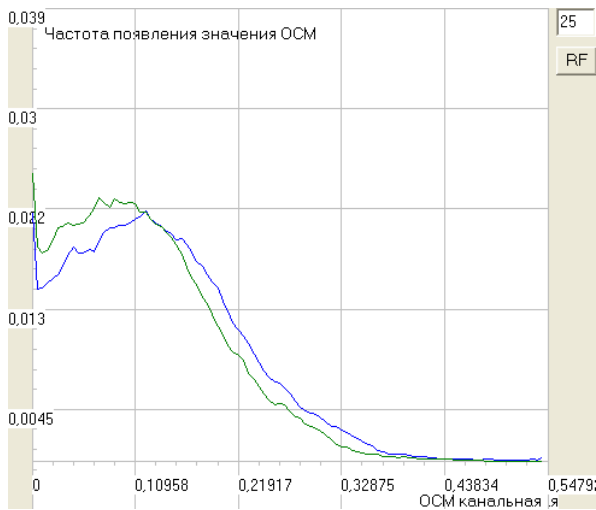
Изменение распределения **канальной ОСМ** женского речевого сигнала:



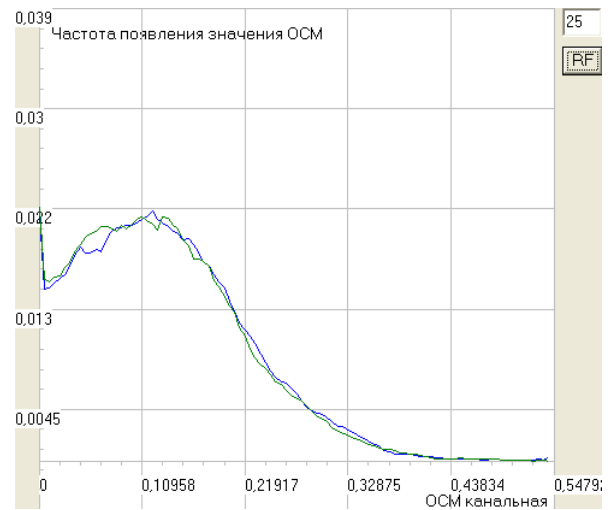
**Рис.3.1.31.** Распределения ОСМк женского речевого сигнала до и после обработки кодеком с цифровой скоростью 32 кбит/с



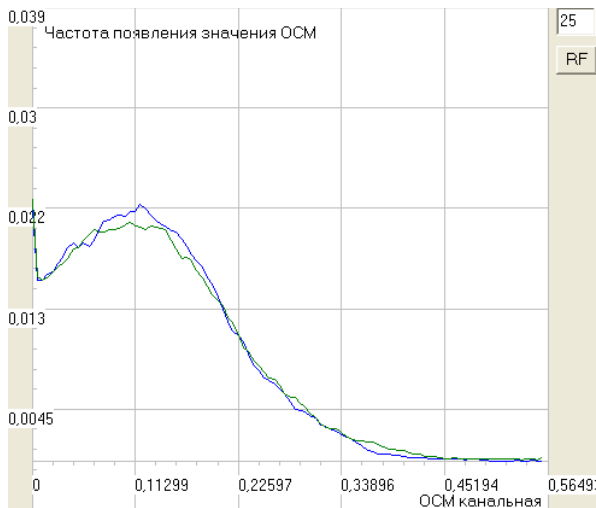
**Рис. 3.1.32.** Распределения ОСМк женского речевого сигнала до и после обработки кодеком с цифровой скоростью 16 кбит/с



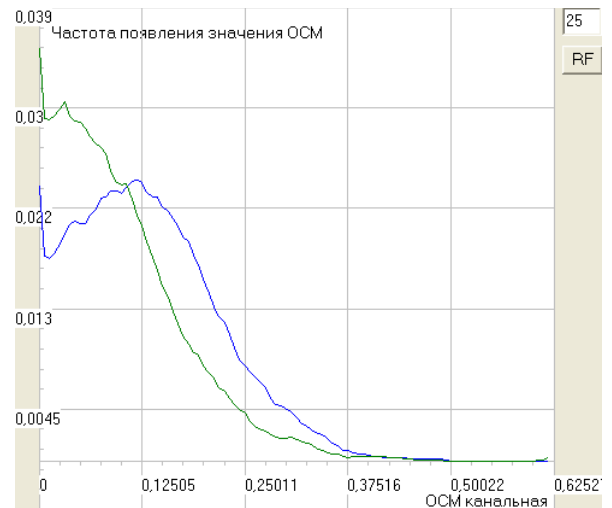
**Рис. 3.1.33.** Распределения OSMк женского речевого сигнала до и после обработки кодеком с цифровой скоростью 13 кбит/с



**Рис. 3.1.34.** Распределения OSMк женского речевого сигнала до и после обработки кодеком с цифровой скоростью 12 кбит/с

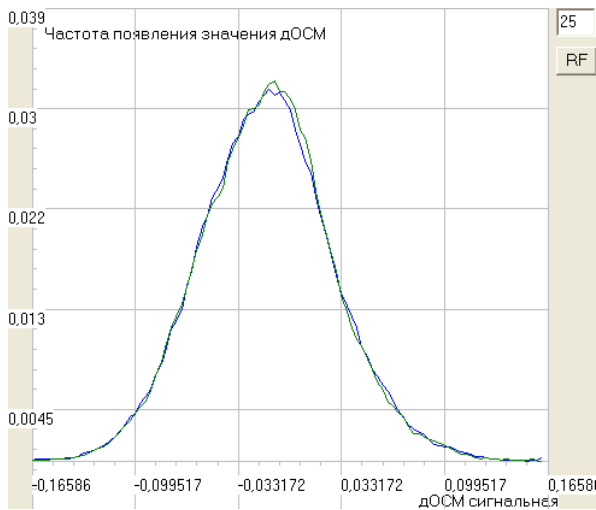


**Рис.3.1.35.** Распределения OSMк женского речевого сигнала до и после обработки кодеком с цифровой скоростью 8 кбит/с

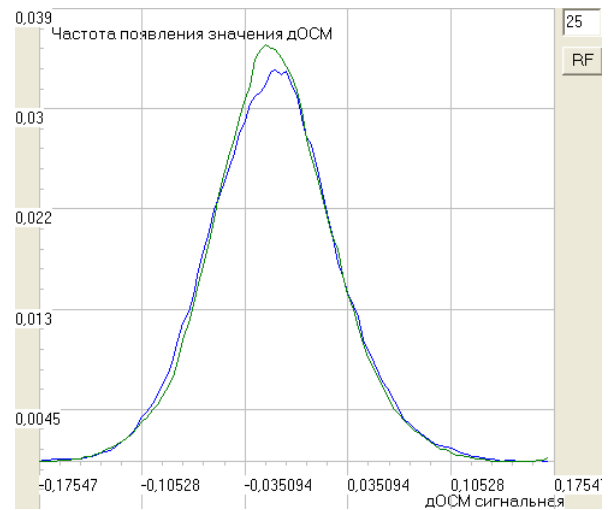


**Рис.3.1.36.** Распределения OSMк женского речевого сигнала до и после обработки кодеком с цифровой скоростью 4,8 кбит/с

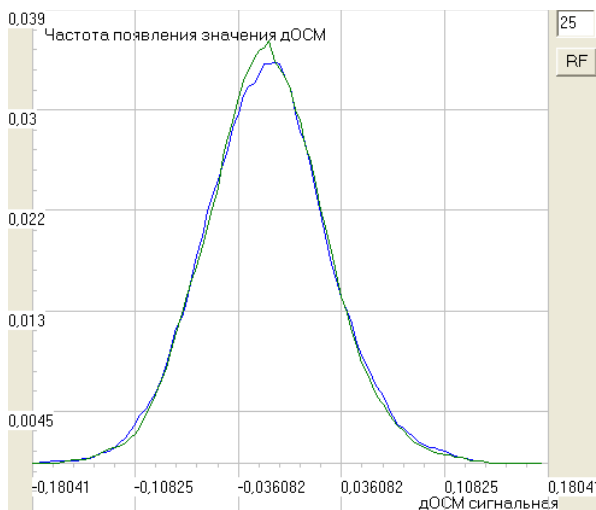
Изменение распределения **дифференциальных сигнальных OSM** женского речевого сигнала:



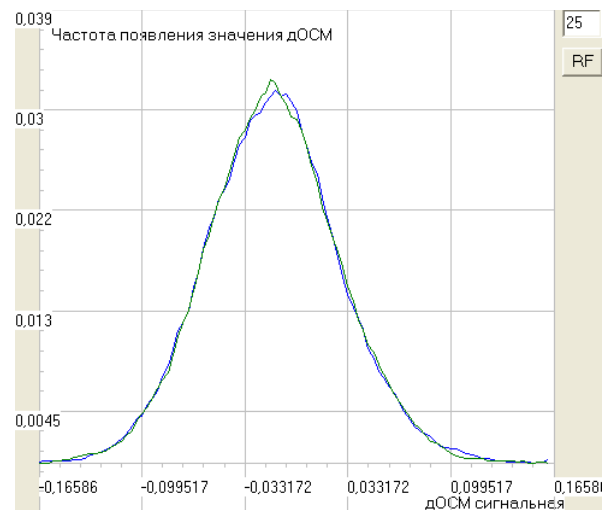
**Рис. 3.1.37.** Распределения ДОСМс женского речевого сигнала до и после обработки кодеком с цифровой скоростью 32 кбит/с



**Рис. 3.1.38.** Распределения ДОСМс женского речевого сигнала до и после обработки кодеком с цифровой скоростью 16 кбит/с

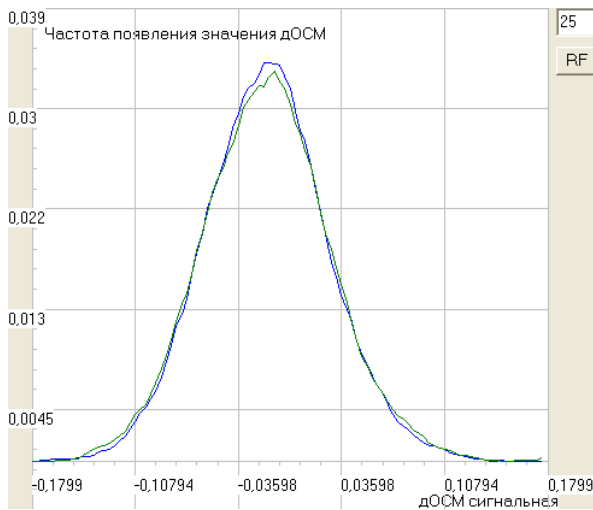


**Рис. 3.1.39.** Распределения ДОСМс женского речевого сигнала до и после обработки кодеком с цифровой скоростью 13 кбит/с

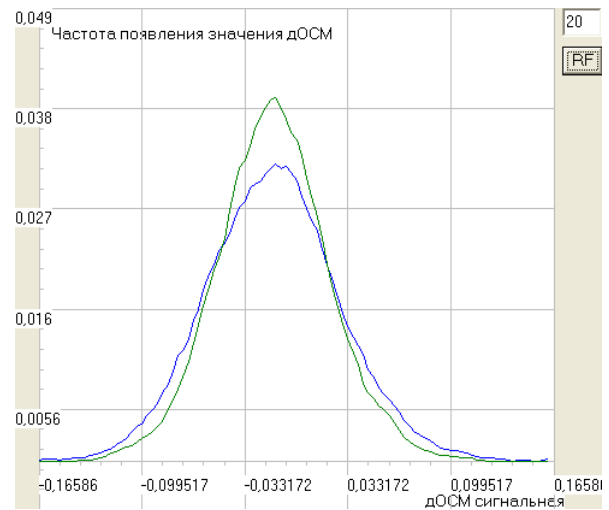


**Рис. 3.1.40.** Распределения ДОСМс женского речевого сигнала до и после обработки кодеком с цифровой скоростью 12 кбит/с



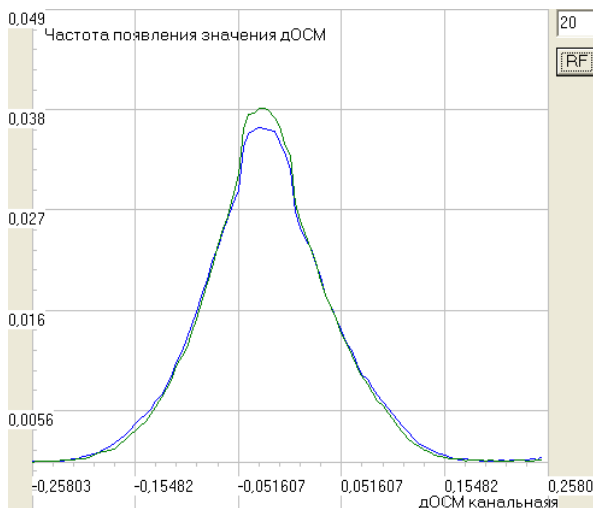


**Рис. 3.1.41.** Распределения дОСМ женского речевого сигнала до и после обработки кодеком с цифровой скоростью 8 кбит/с

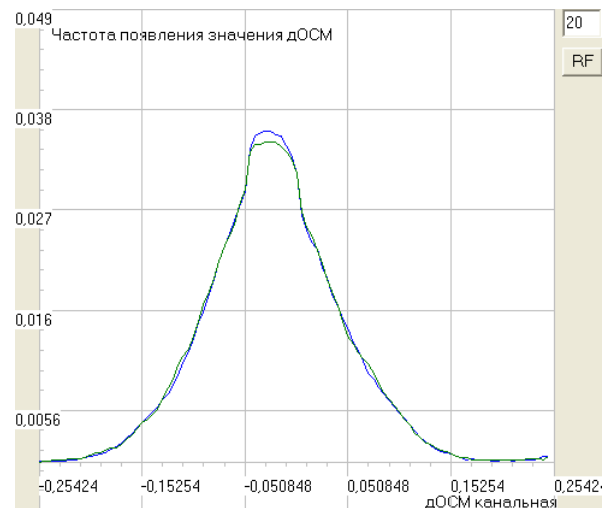


**Рис. 3.1.42.** Распределения дОСМ женского речевого сигнала до и после обработки кодеком с цифровой скоростью 4,8 кбит/с

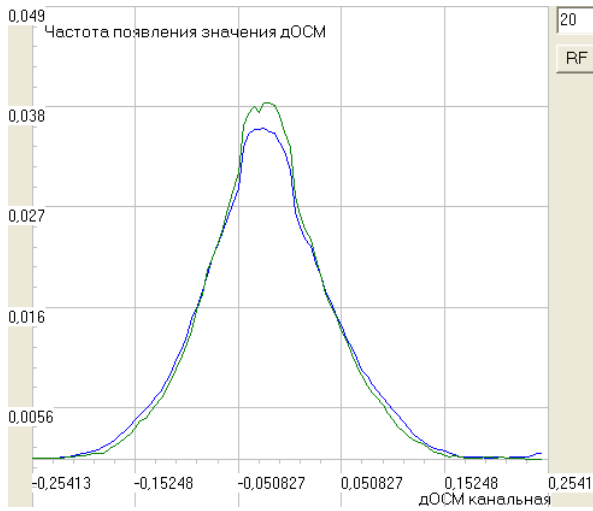
Изменение распределения **дифференциальных канальных ОСМ** женского речевого сигнала:



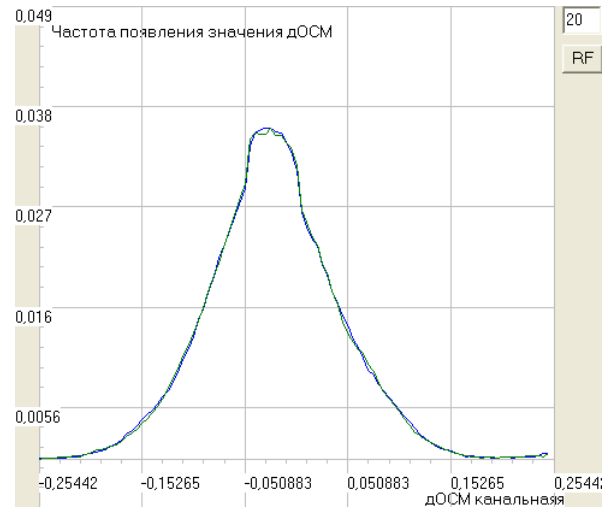
**Рис. 3.1.43.** Распределения дОСМк женского речевого сигнала до и после обработки кодеком с цифровой скоростью 32 кбит/с



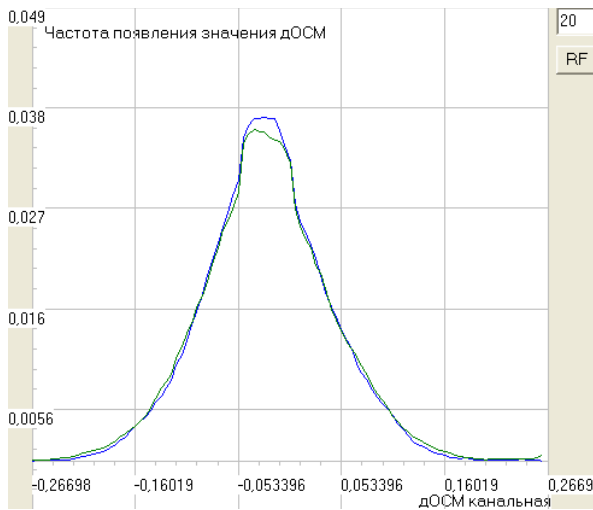
**Рис. 3.1.44.** Распределения дОСМк женского речевого сигнала до и после обработки кодеком с цифровой скоростью 16 кбит/с



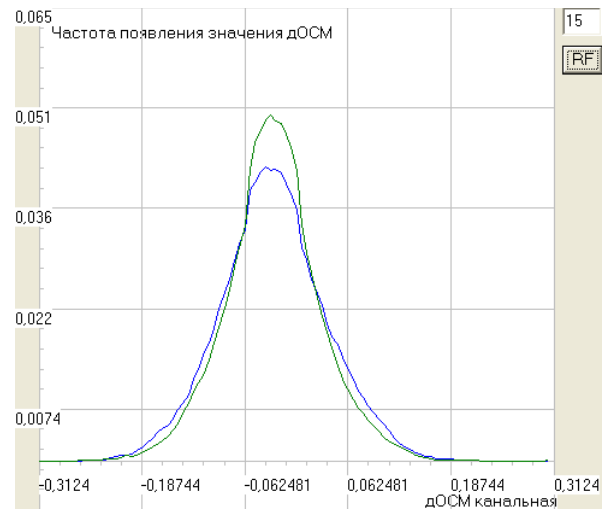
**Рис. 3.1.45.** Распределения дОСМк женского речевого сигнала до и после обработки кодеком с цифровой скоростью 13 кбит/с



**Рис. 3.1.46.** Распределения дОСМк женского речевого сигнала до и после обработки кодеком с цифровой скоростью 12 кбит/с



**Рис. 3.1.47.** Распределения дОСМк женского речевого сигнала до и после обработки кодеком с цифровой скоростью 8 кбит/с



**Рис. 3.1.48.** Распределения дОСМк женского речевого сигнала до и после обработки кодеком с цифровой скоростью 4,8 кбит/с

Результаты вычислений энергетических параметров сигналов с различной степенью сжатия приведены в виде графиков на Рис.3.1.49.-3.1.60.

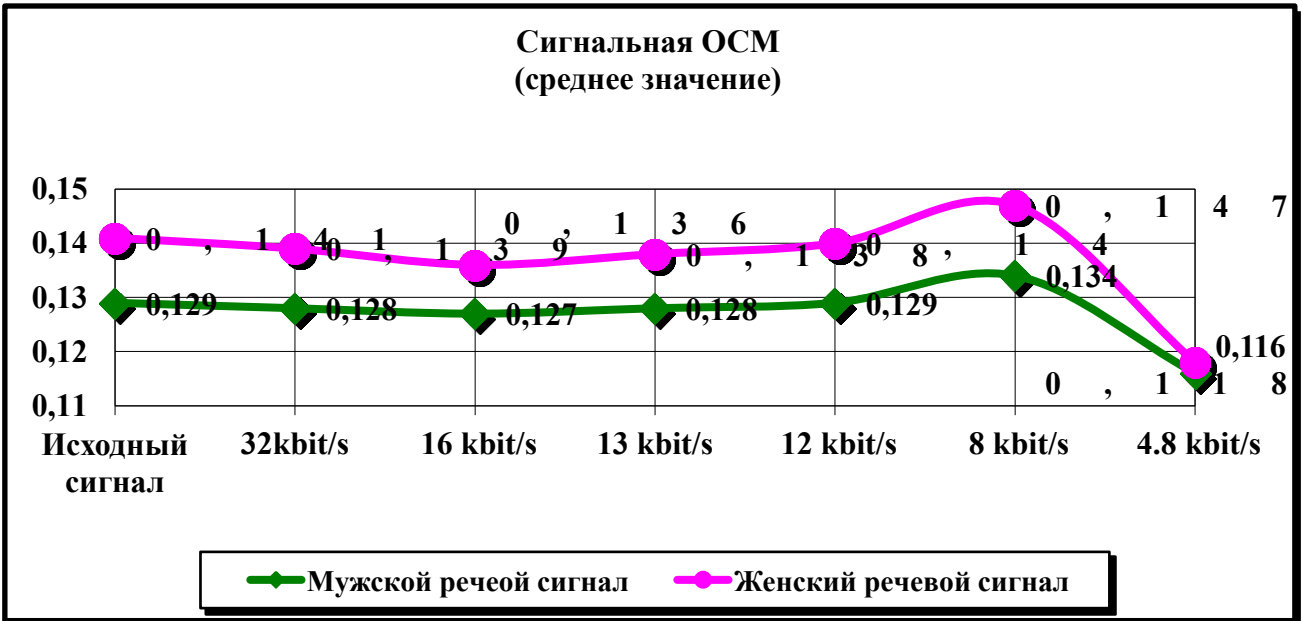


Рис. 3.1.49. Изменение среднего значения ОСМс

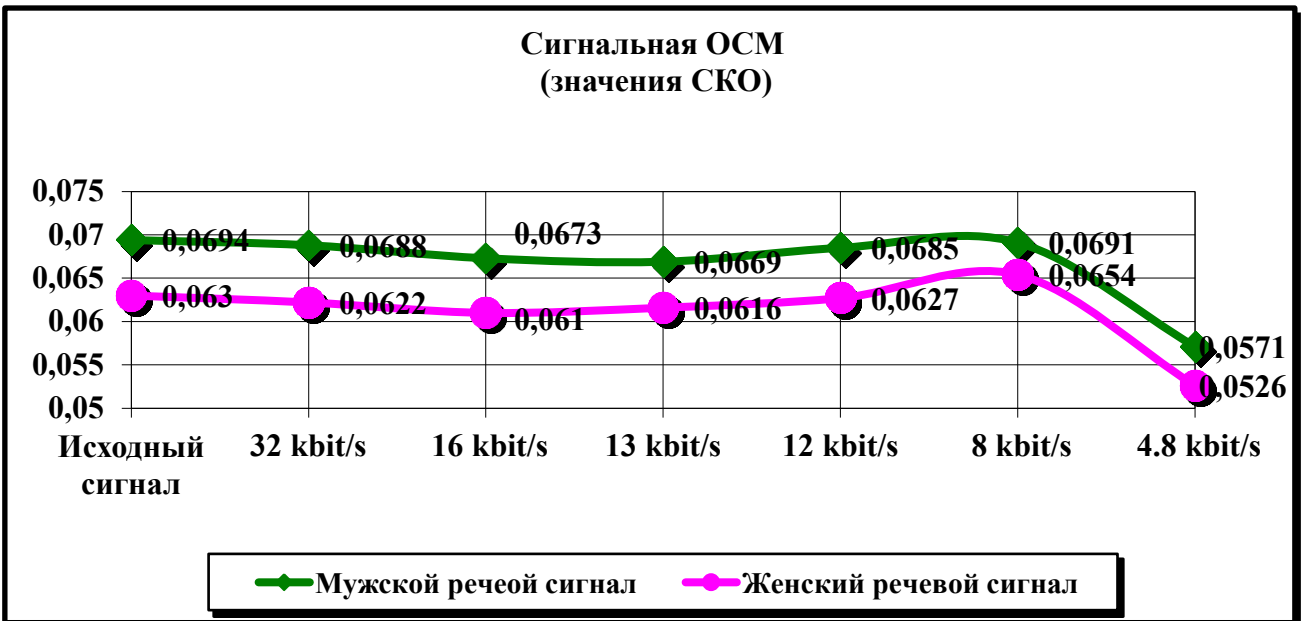


Рис. 3.1.50. Изменение СКО значений ОСМс

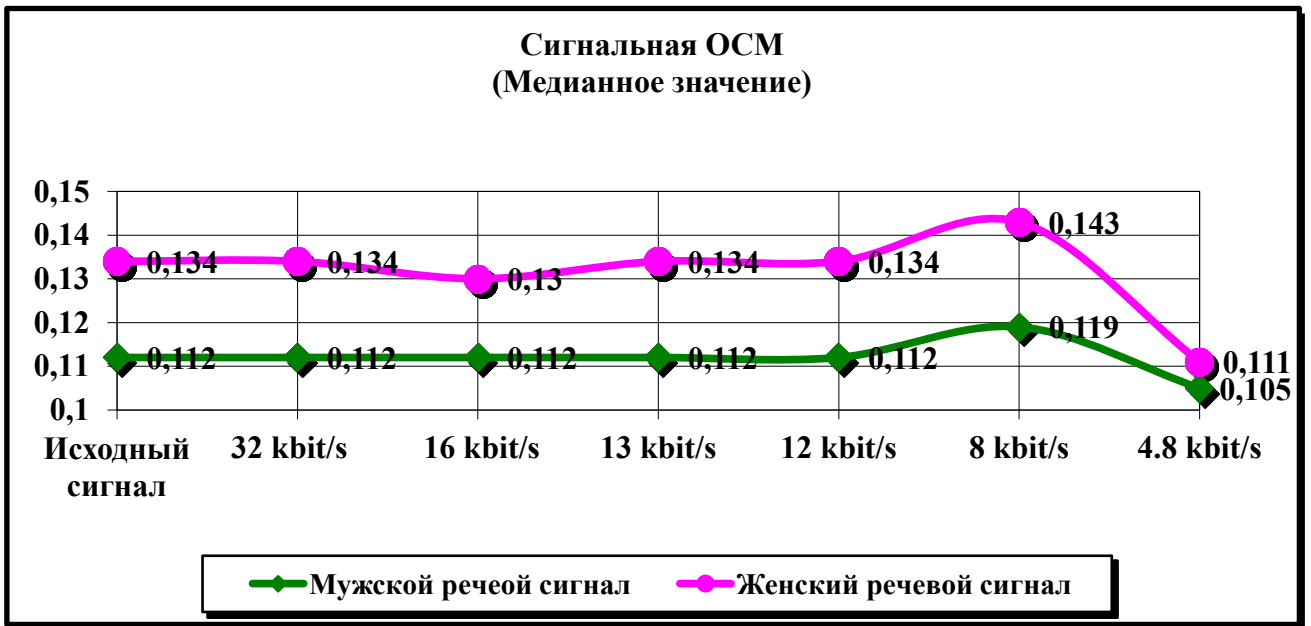


Рис. 3.1.51. Изменение медианного значения ОСМс.

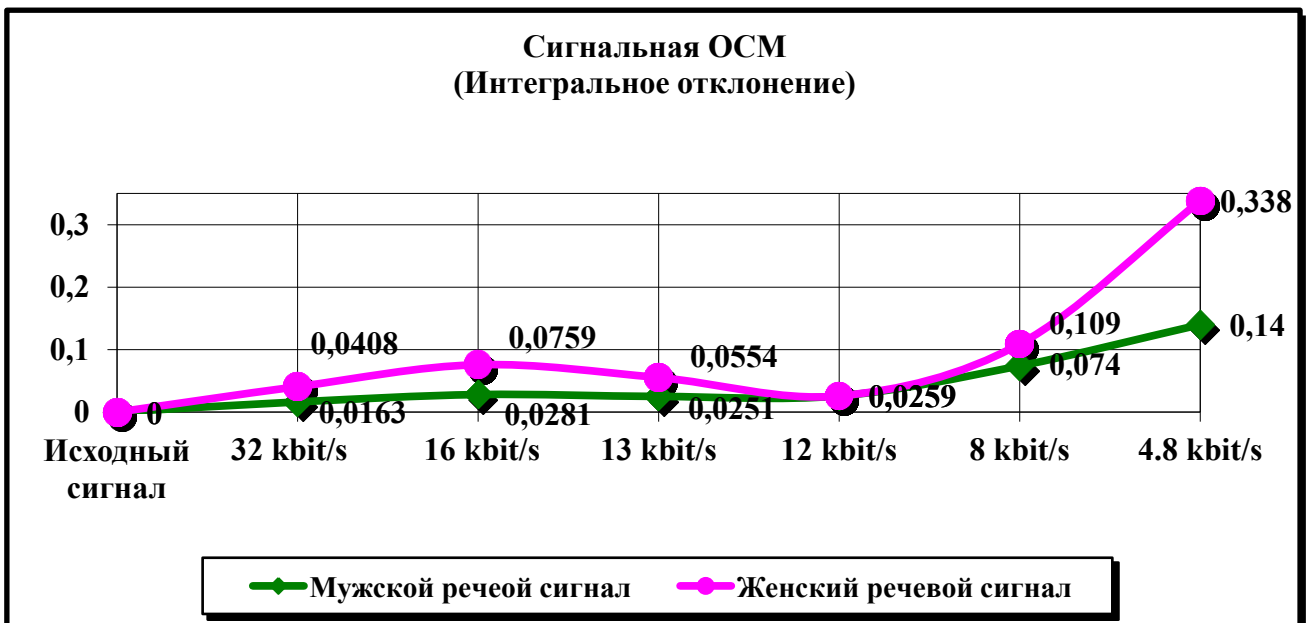


Рис. 3.1.52. Изменение интегрального отклонения ОСМс.

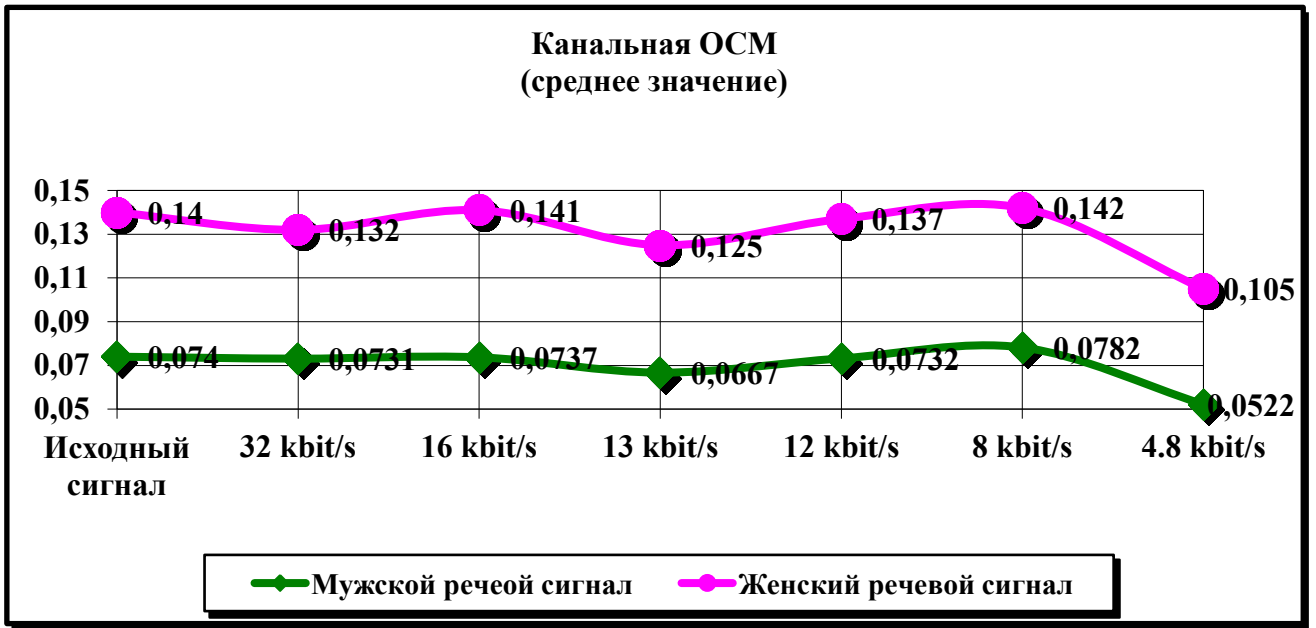


Рис. 3.1.53. Изменение среднего значения ОСМк.

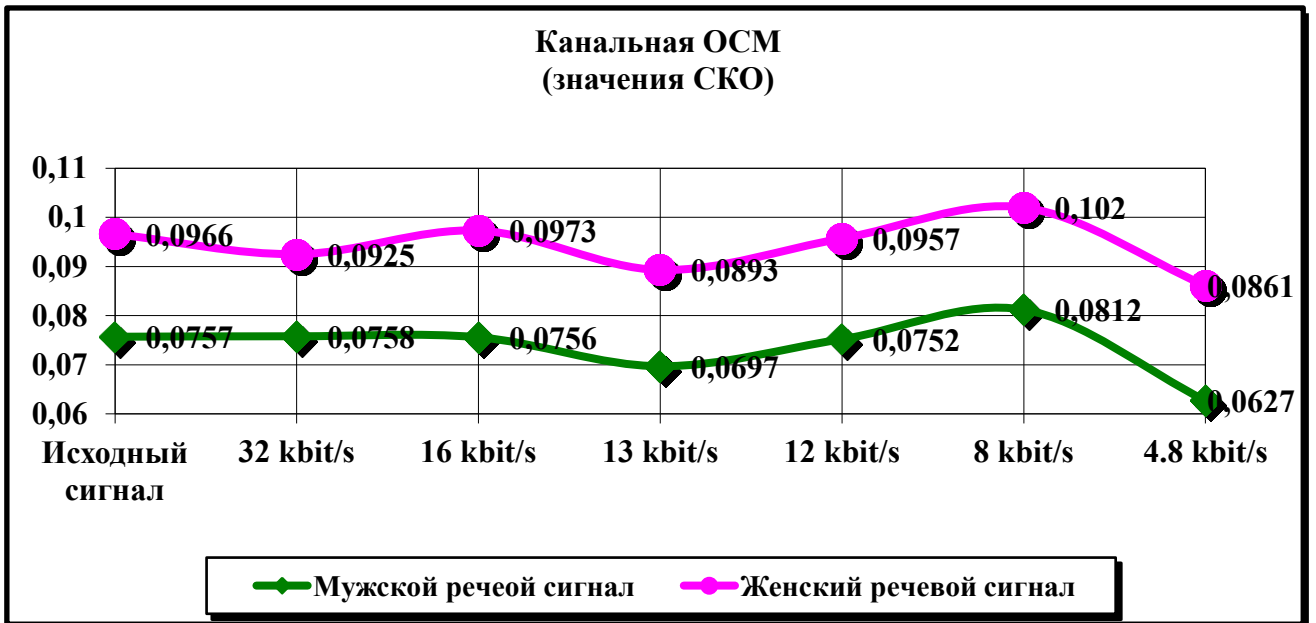


Рис. 3.1.54. Изменение СКО значений ОСМк

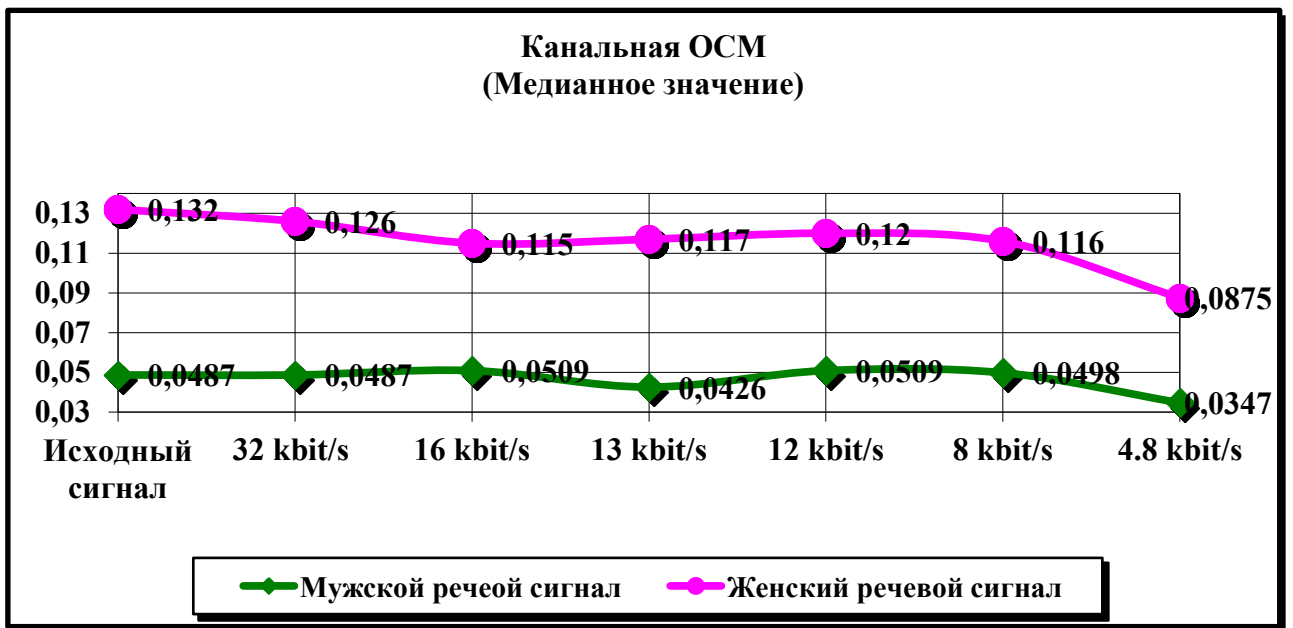


Рис. 3.1.55. Изменение медианного значения ОСМк.

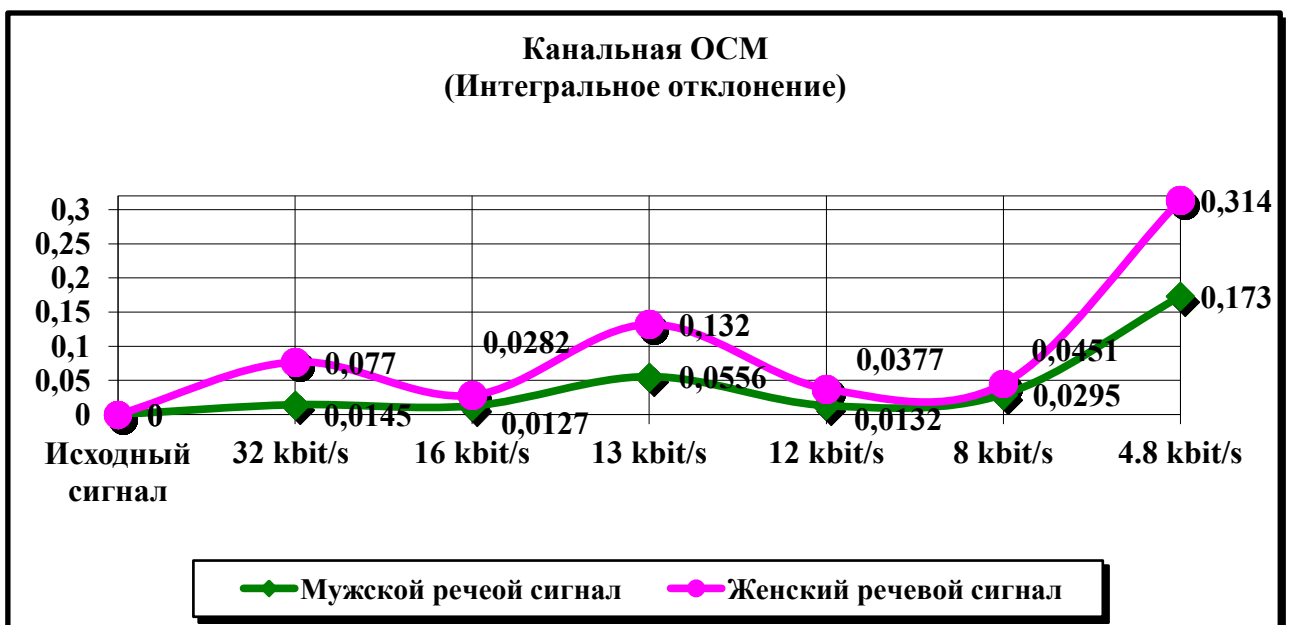


Рис. 3.1.56. Изменение интегрального отклонения ОСМк.

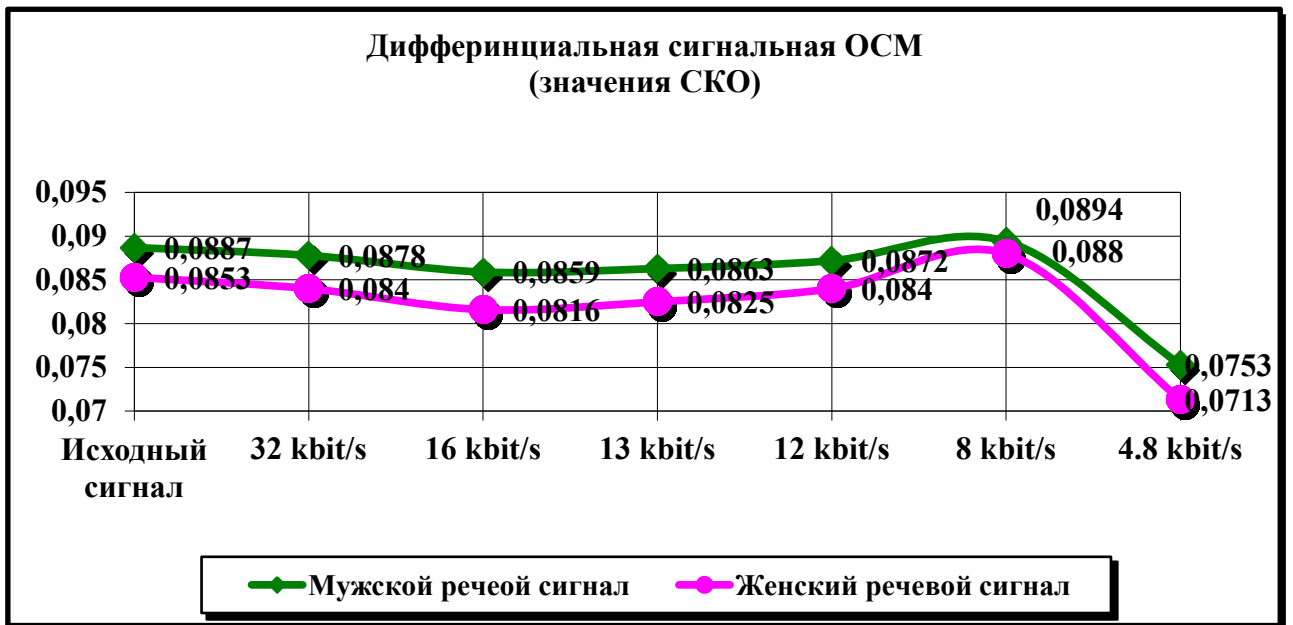


Рис. 3.1.57. Изменение СКО значений дОСМс.

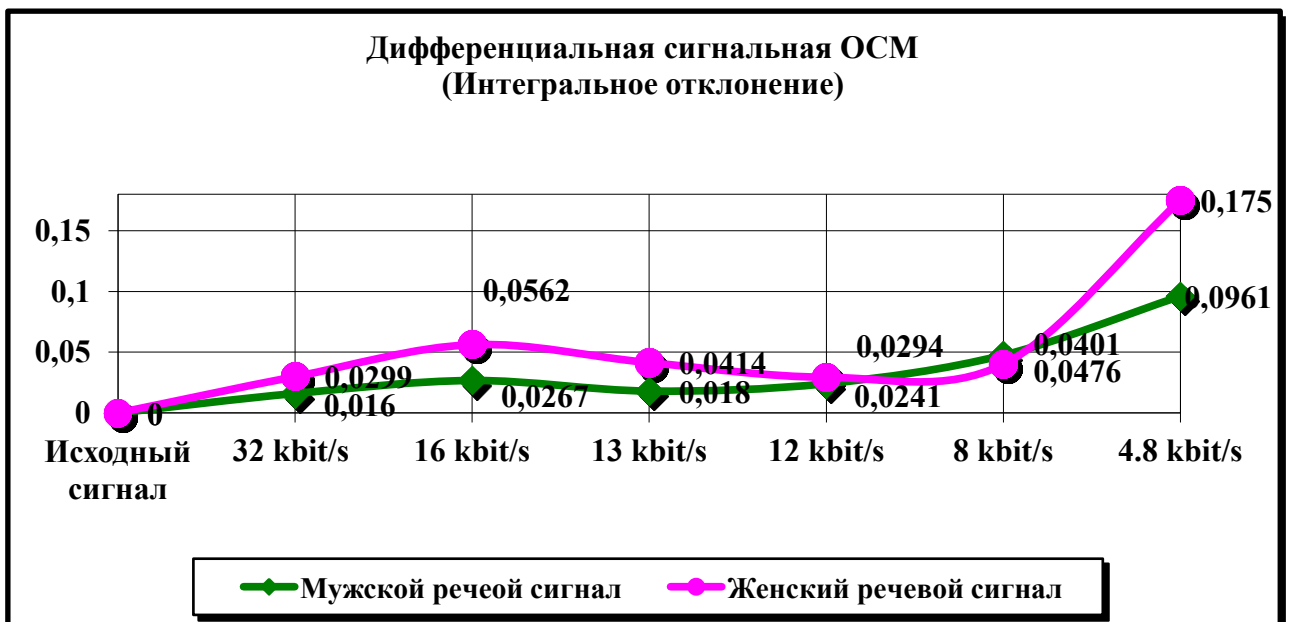


Рис. 3.1.58. Изменение интегрального отклонения дОСМс.

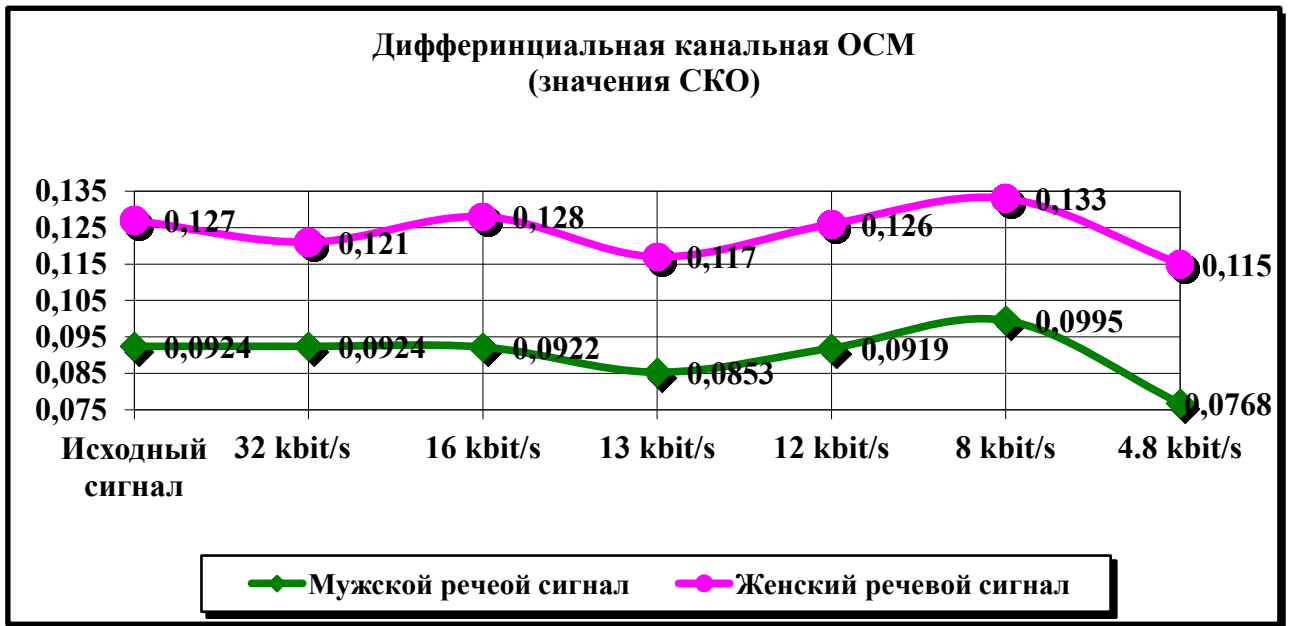


Рис. 3.1.59. Изменение СКО значений дОСМк

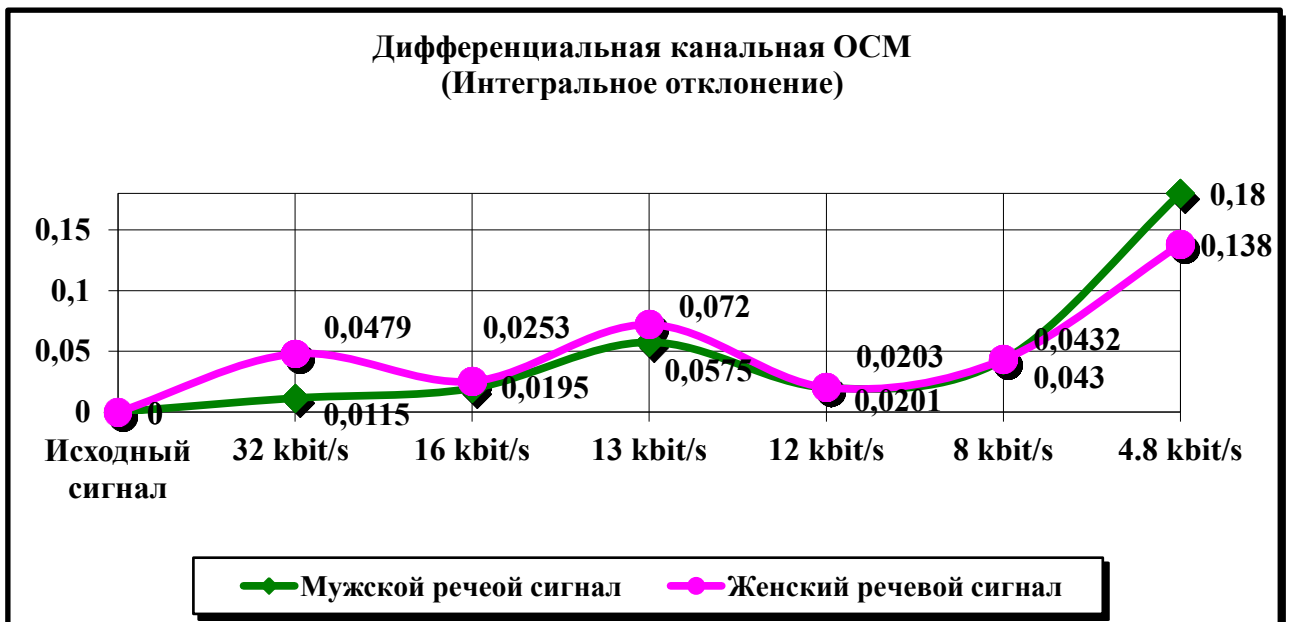


Рис 3.1.60. Изменение интегрального отклонения дОСМк.



Как следует из результатов проведенных исследований, после сжатия мужского и женского речевых сигналов кодеками с различной цифровой скоростью (от 32 до 4.8 кбит/с), претерпевают значительные изменения, как распределения сигнальных ОСМ и дифференциальных сигнальных дОСМ, так и распределения канальных ОСМ и дифференциальных канальных дОСМ. Численно это выражается в изменении среднего, интегрального отклонения, медианного значений и СКО, как сигнальной ОСМ и дифференциальной сигнальной ОСМ, так и канальной ОСМ и дифференциальной канальной ОСМ.

### **3.5. Характер изменения значений ОСМс и дОСМс**

Характер изменения значений ОСМс и дОСМс примерно одинаков. Для скоростей выше 12 кбит/с изменения минимальны. Для кодека с цифровой скоростью 8кбит/с наблюдается увеличение среднего, медианного и СКО значений ОСМ, а для кодека со скоростью 4,8 кбит/с – резкий их спад. Интегральное отклонение значений ОСМ для высокоскоростных кодеков (12-32 кбит/с) изменяется незначительно, и, напротив, для кодеков со скоростями меньшими, чем 12 кбит/с имеет тенденцию к резкому увеличению.

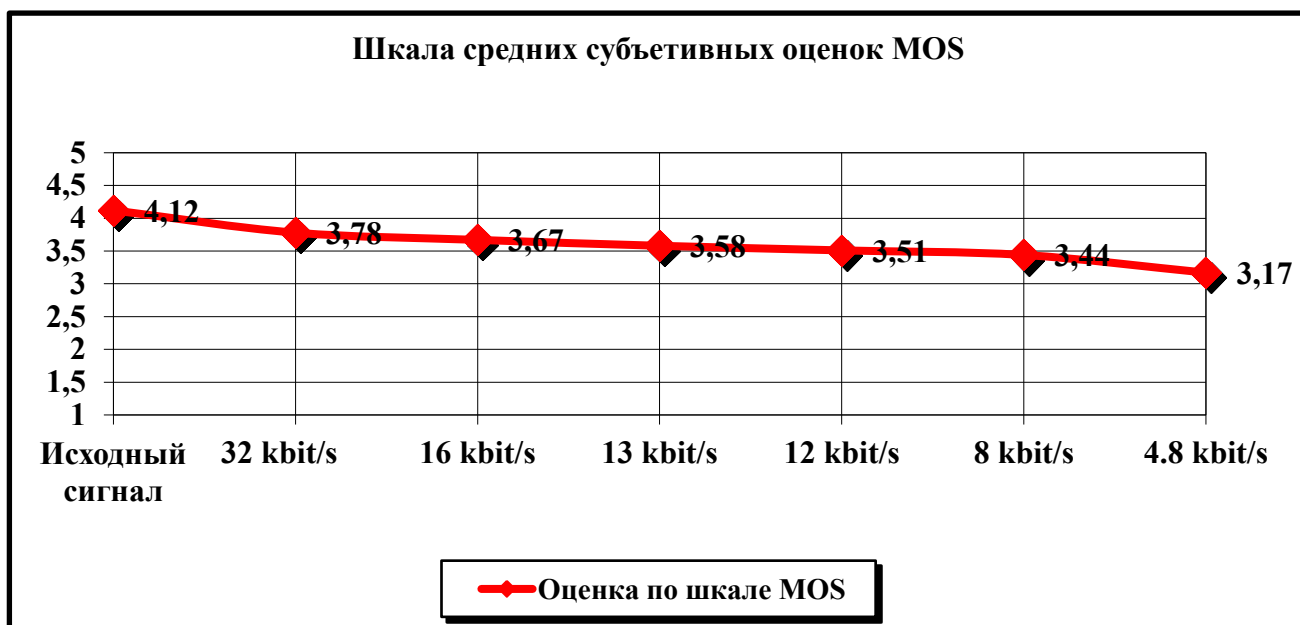
### **3.6. Характер изменения значений ОСМк и дОСМк**

Характер изменения значений ОСМк и дОСМк мужского и женского речевых сигналов сильно различается. У мужского речевого сигнала для скоростей выше 12 кбит/с изменения минимальны (характерны изменения аналогичные изменениям ОСМс и дОСМс). У женского речевого сигнала для скоростей выше 12 кбит/с изменения несколько больше, чем для мужского, а также характерно уменьшение значений с уменьшением цифровой скорости используемого кодека.

Заметные изменения в процессе сжатия именно этих параметров приводят к потере интеллектуального, чувственного и эмоционального

содержания, определяемого динамическими контрастами, акцентированием элементов. Кроме того, поскольку канальная ОСМ отражает среднюю громкость сигнала, то её снижение оказывает негативное влияние на восприятие абонентом передаваемой информации, независимо от ее эмоциональной окраски. Таким образом, ясно, что высокая заметность изменения сигнала после сжатия его кодеком с низкой цифровой скоростью связана со значительными изменениями его энергетических параметров.

Попытаемся сопоставить полученные нами результаты с оценками исследуемых кодеков по шкале MOS. Данные об оценках приведем на



графике изображенном на Рис.3.1.61.

Рис.3.1.61.Оценки кодеков по шкале MOS

Из приведенного графика видно, что оценка плавно уменьшается с увеличением степени сжатия речевого сигнала.

Сопоставим данные оценок MOS с результатами исследований. Получаем, что наиболее точно изменение субъективных оценок иллюстрирует изменение медианного значения канальной ОСМ для женского речевого сигнала. Это позволяет с определенной точностью спрогнозировать изменение экспертных оценок качества сигнала при его обработке кодеками с различной степенью сжатия.

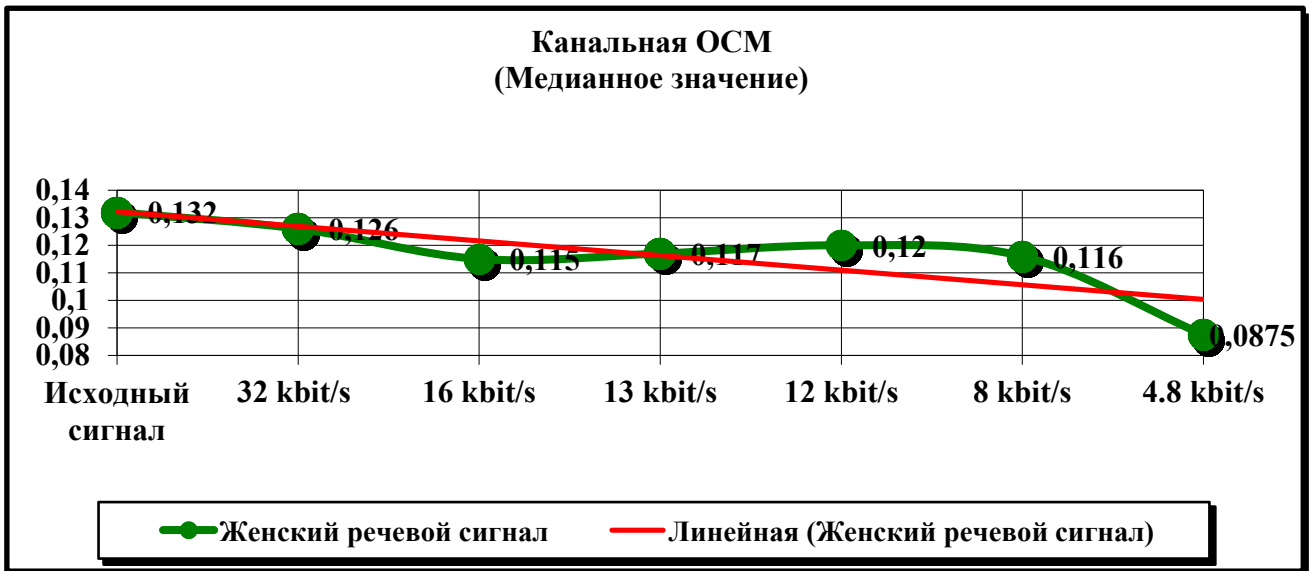


Рис. 3.1.62. Изменение медианного значения ОСМк

На Рис. 3.1.62. помимо диаграммы медианного значения канальной ОСМ красным цветом проведена линия тренда (с помощью линий тренда можно наглядно отобразить тенденции изменения данных, что позволяет упростить их анализ и прогнозирование).

Для подтверждения выводов было произведено исследование изменения медианного значения ОСМк на других женских речевых сигналах. Полученные результаты были внесены в Таблицу 3.1.1.

Таблица 3.1.1. Исследование изменения медианного значения ОСМк на других женских речевых сигналах

	Цифровая скорость кодека						
	Исходный речевой сигнал	32 кбит/с	16 кбит/с	13 кбит/с	12 кбит/с	8 кбит/с	4,8 кбит/с
Медианное значение ОСМк	0,115	0,108	0,11	0,101	0,103	0,99	0,0812
	0,0736	0,0714	0,0698	0,0621	0,0632	0,0652	0,0588
	0,083	0,0785	0,0751	0,0723	0,0738	0,0736	0,0622

**Выводы:**

В итоге исследования стало ясно что, актуальность задачи объективизации контроля качества передачи речевых сигналов является очевидной. Так как, по существу, субъективная оценка качества речи является интегральной, то логично предположить, что она связана с интегральными статистическими распределениями параметров речевого сигнала, определяющими энергетические (громкостные), динамические свойства сигнала. Исследуя энергетические параметры РС, прошедшего сжатие кодеками с различной цифровой скоростью, выясним связь их изменений с заметностью искажений сигнала.

# ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ УХУДШЕНИЕ КАЧЕСТВА РЕЧЕВОГО СИГНАЛА В СОСТАВНЫХ КАНАЛАХ СПРС, РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА КОМПЕНСАЦИИ ИСКАЖЕНИИ

## 4.1 Исследование зависимости параметров РС от скорости передачи

Исследованию подлежат мужской и женский речевые сигналы, прошедшие обработку, характерную для современных СПРС – сжатие объема сигнала кодеками с различной цифровой скоростью (от 32 кбит/с до 4,8 кбит/с).

Исследуя спектры речевых сигналов, прошедших сжатие кодеками с различной цифровой скоростью, выясним связь их изменений с заметностью искажений сигнала.

Изменения спектра мужского речевого сигнала хорошо заметны на графиках, приведенных ниже на Рис.4.1.-4.2.

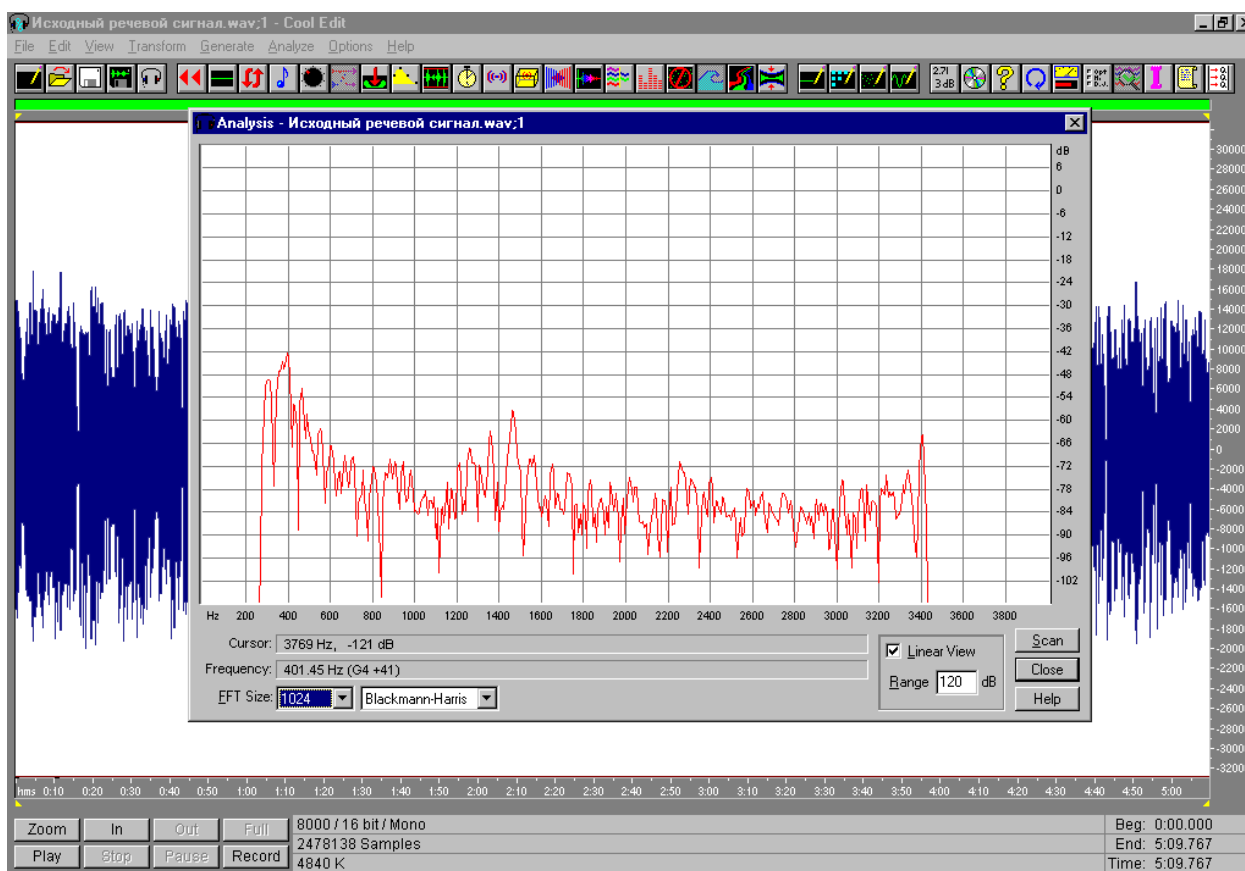


Рис.4.1. Спектр исходного мужского речевого сигнала

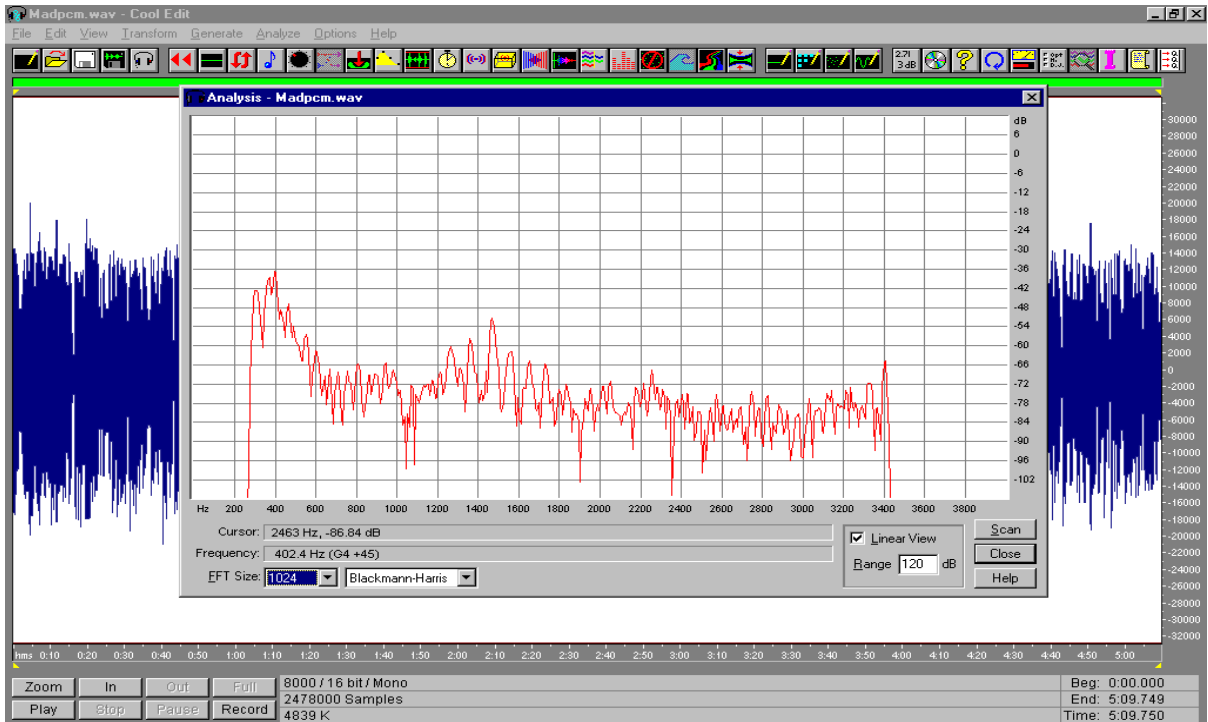


Рис. 4.2. Спектр мужского речевого сигнала после обработки кодеком с цифровой скоростью 32 кбит/с

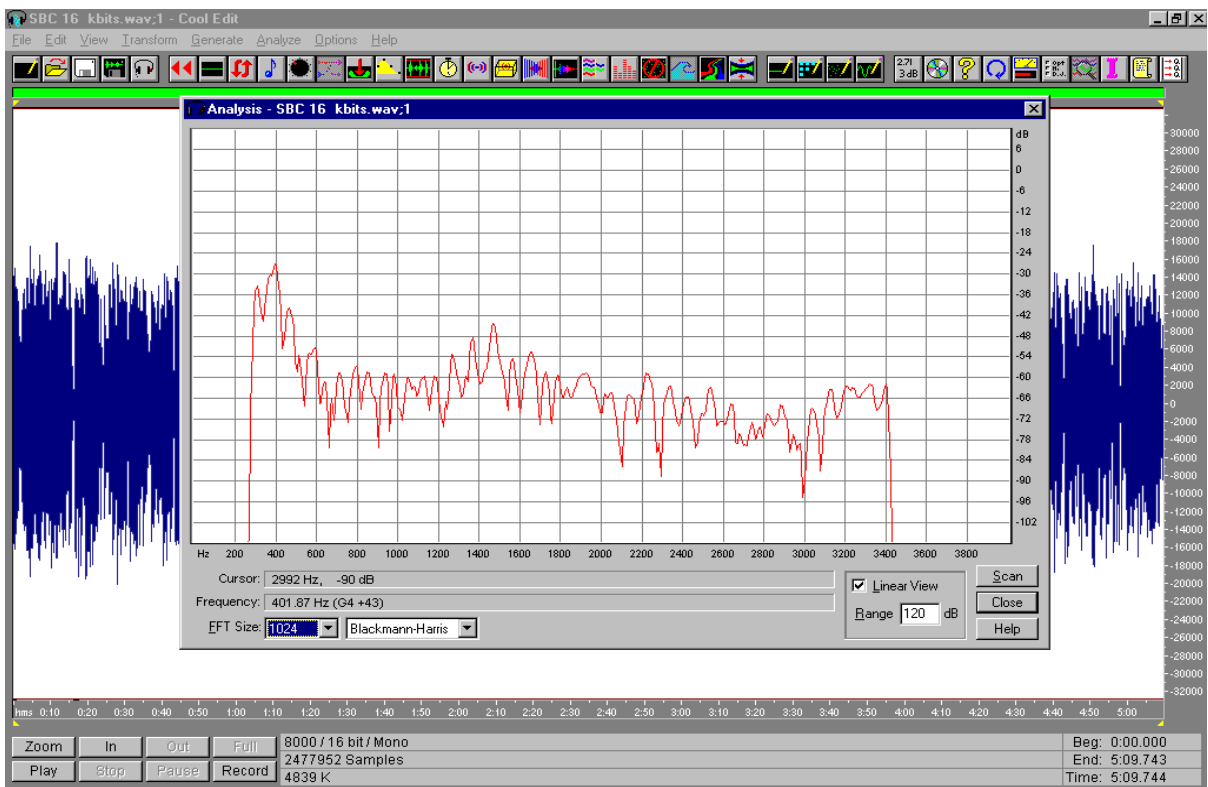


Рис 4.3. Спектр мужского речевого сигнала после обработки кодеком с цифровой скоростью 16 кбит/с

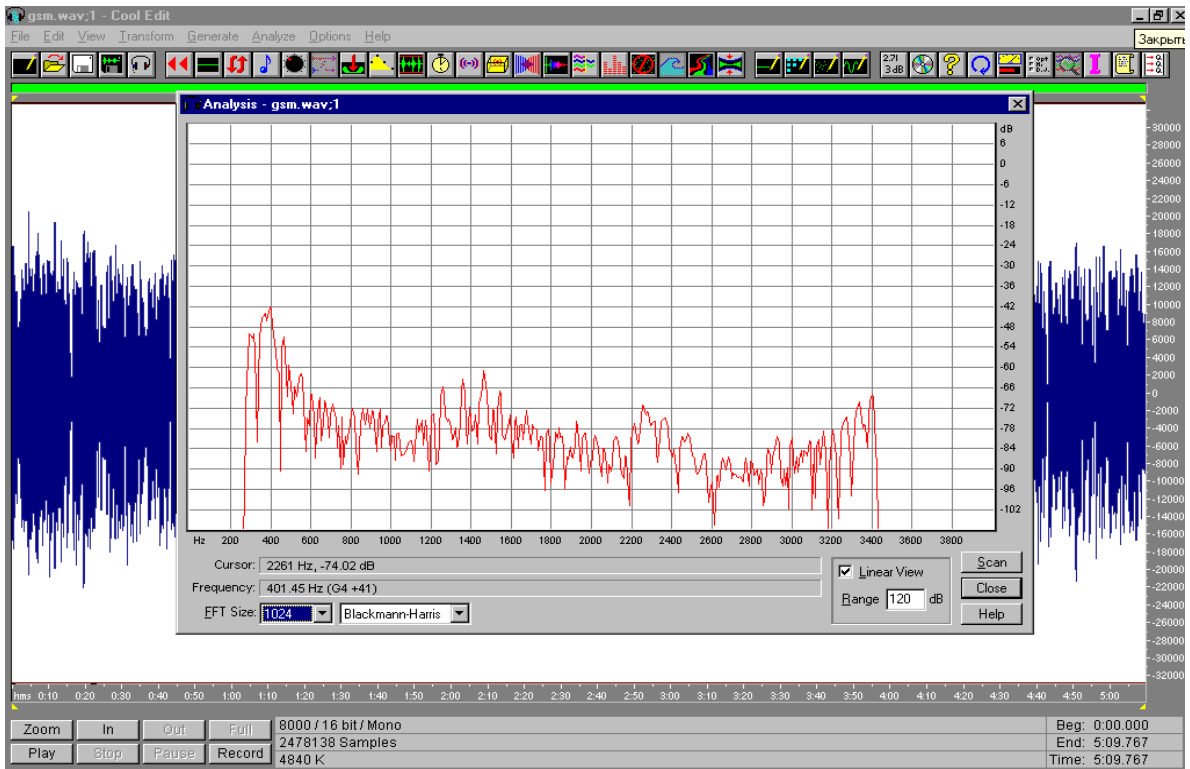


Рис. 4.4. Спектр мужского речевого сигнала после обработки кодеком с цифровой скоростью 13 кбит/с

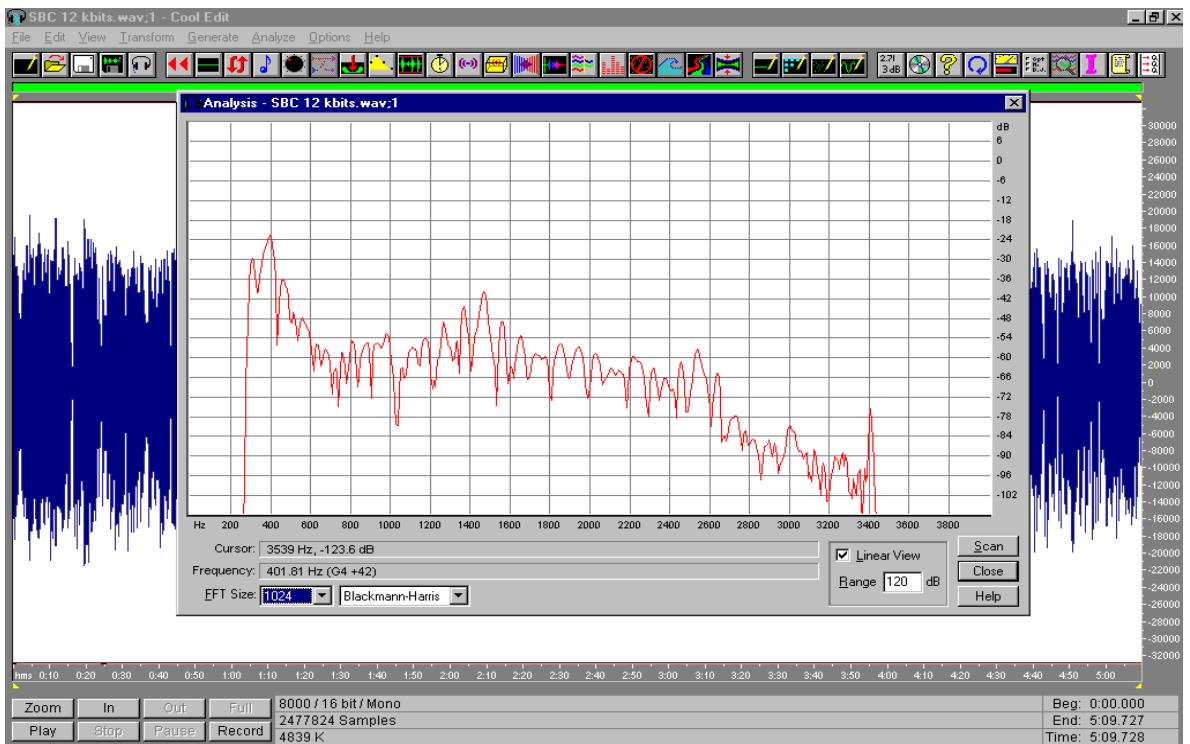


Рис. 4.5. Спектр мужского речевого сигнала после обработки кодеком с цифровой скоростью 12 кбит/с.

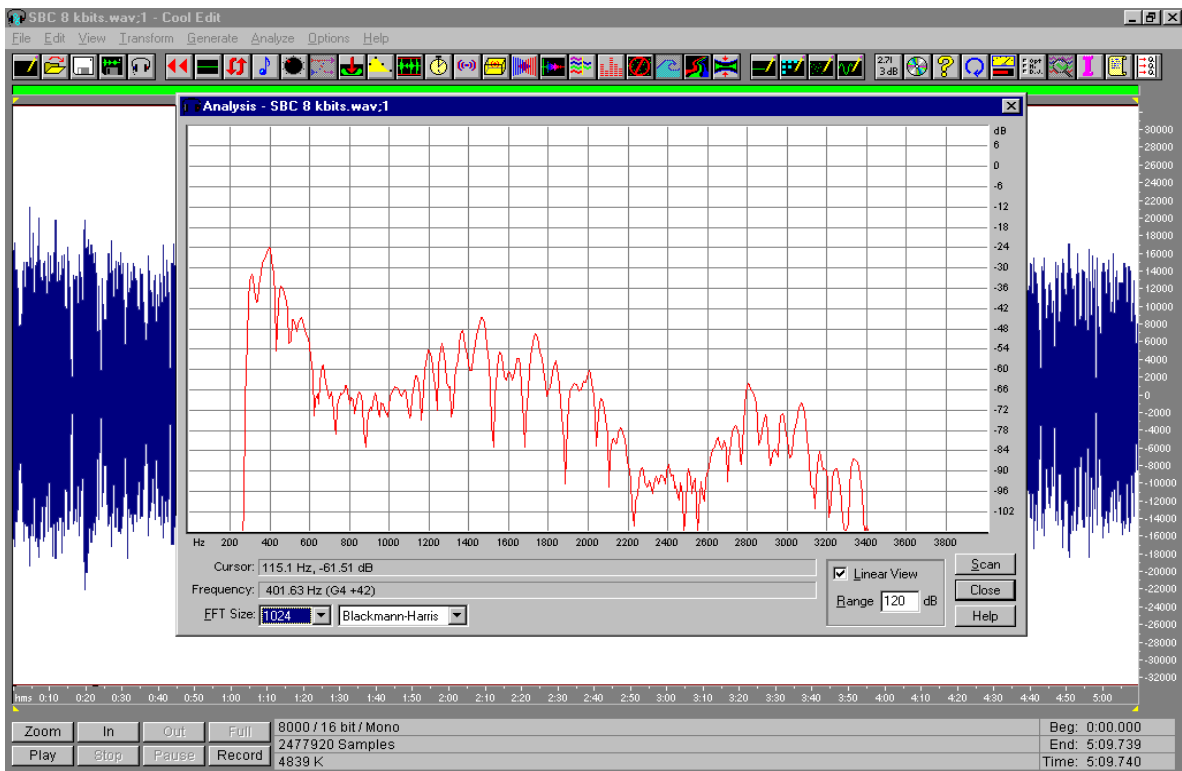


Рис. 4.6. Спектр мужского речевого сигнала после обработки кодеком с цифровой скоростью 8 кбит/с.

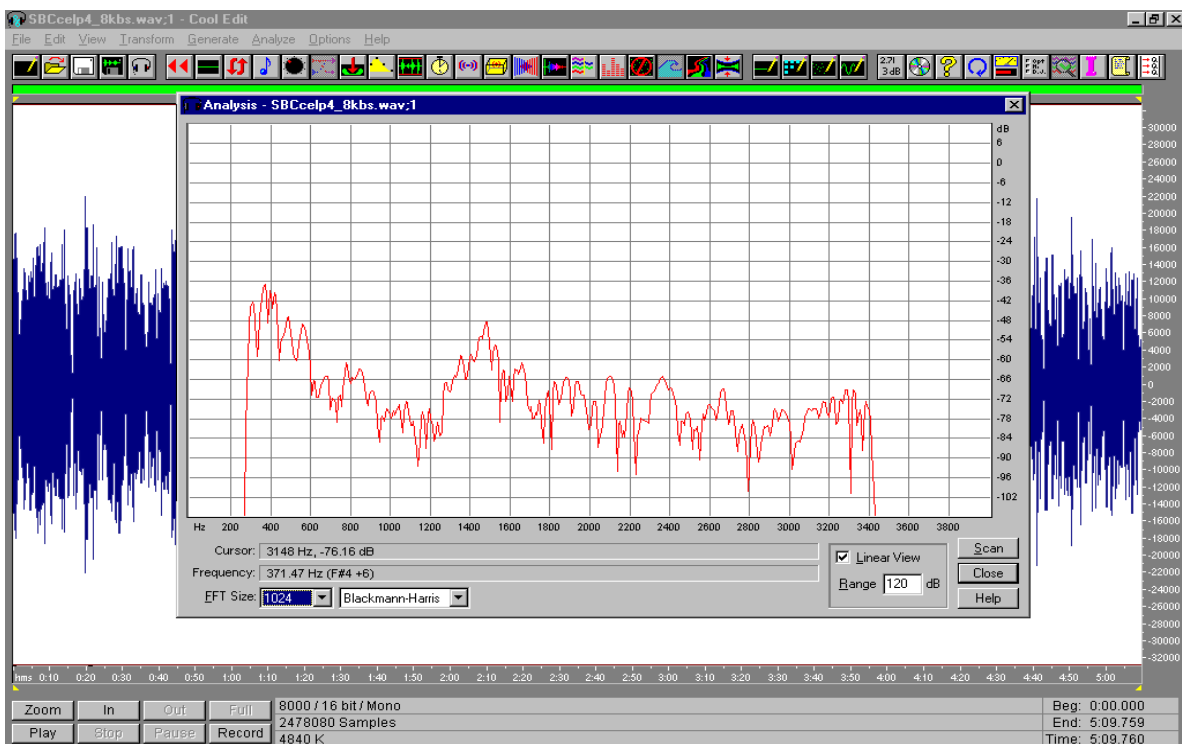


Рис 4.7. Спектр мужского речевого сигнала после обработки кодеком с цифровой скоростью 4,8 кбит/с.



Изменения спектра женского речевого сигнала хорошо заметны на графиках, приведенных ниже на Рис.4.8-4.14.

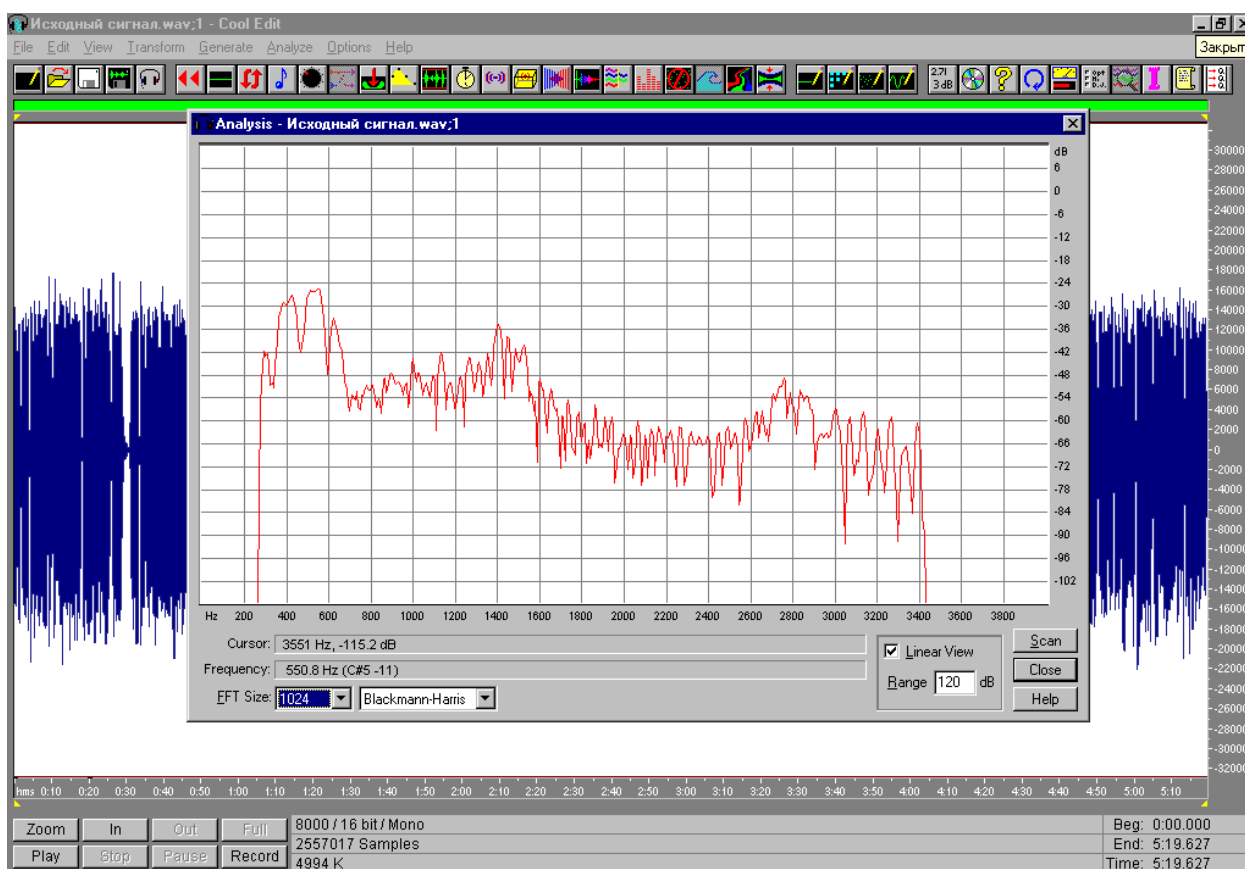


Рис.4.8. Спектр исходного женского речевого сигнала

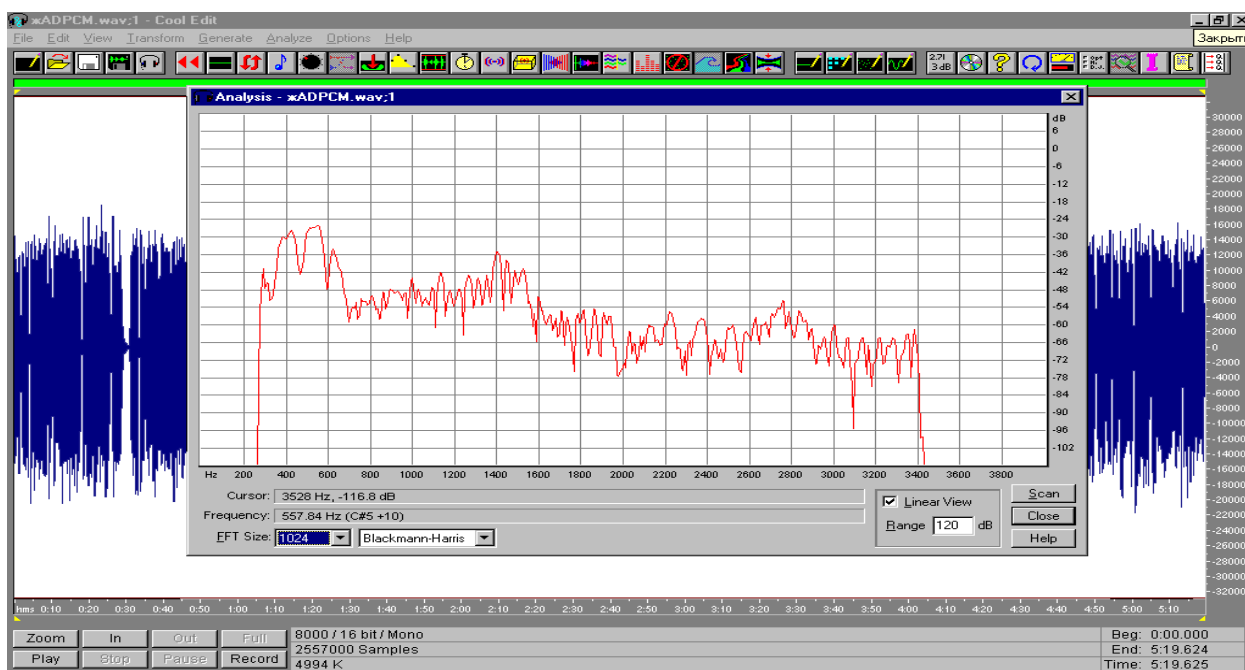


Рис. 4.9. Спектр женского речевого сигнала после обработки кодеком с цифровой скоростью 32 кбит/с.

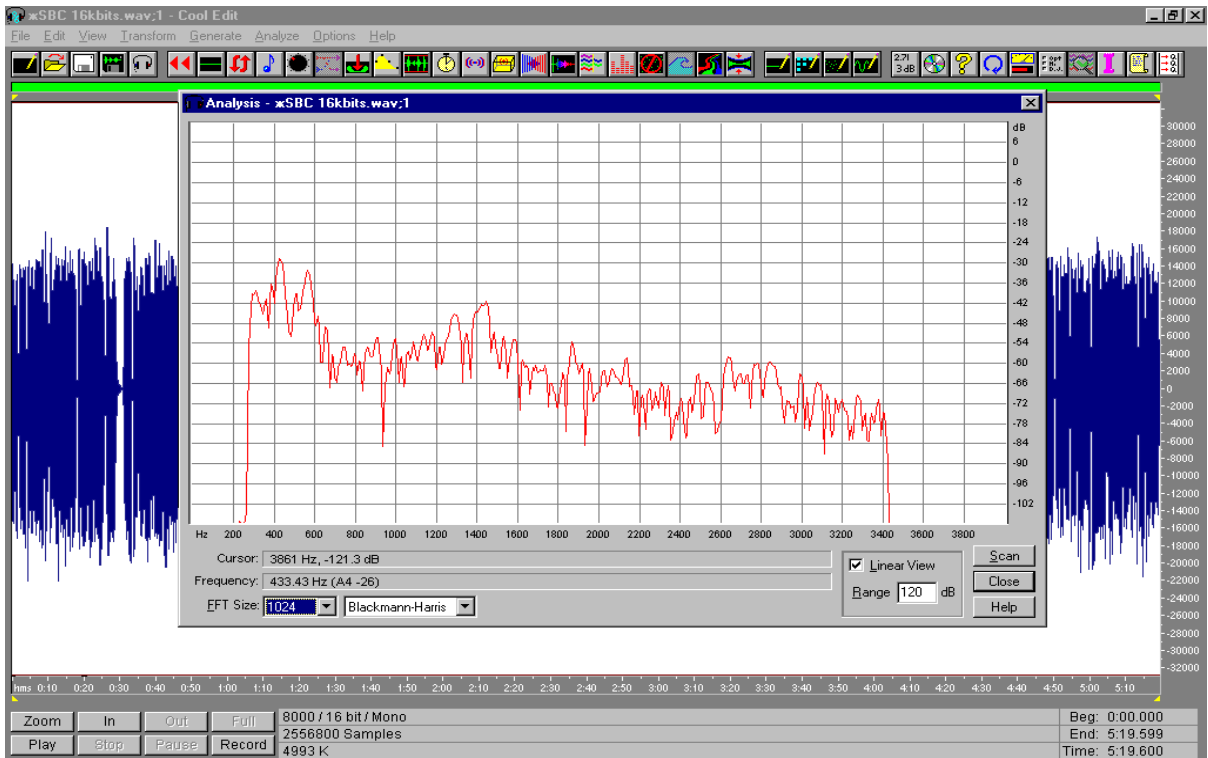


Рис 4.10. Спектр женского речевого сигнала после обработки кодеком с цифровой скоростью 16 кбит/с.

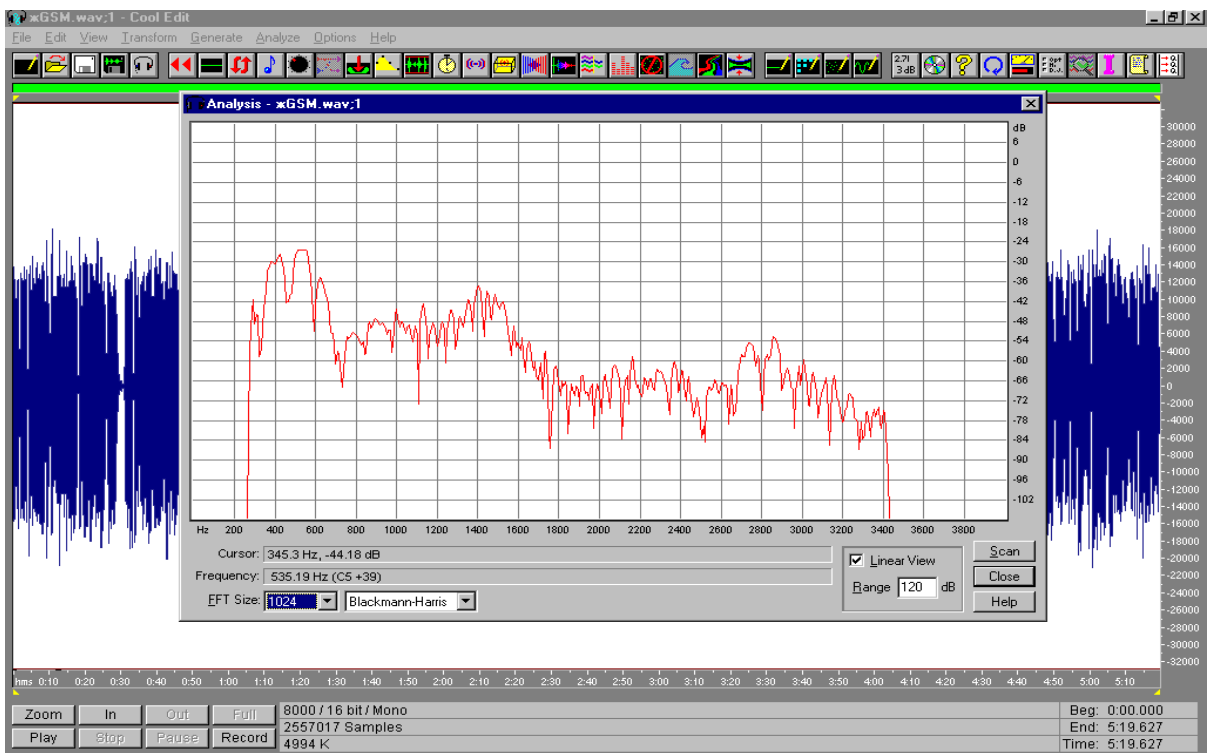


Рис. 4.11. Спектр женского речевого сигнала после обработки кодеком с цифровой скоростью 13 кбит/с.

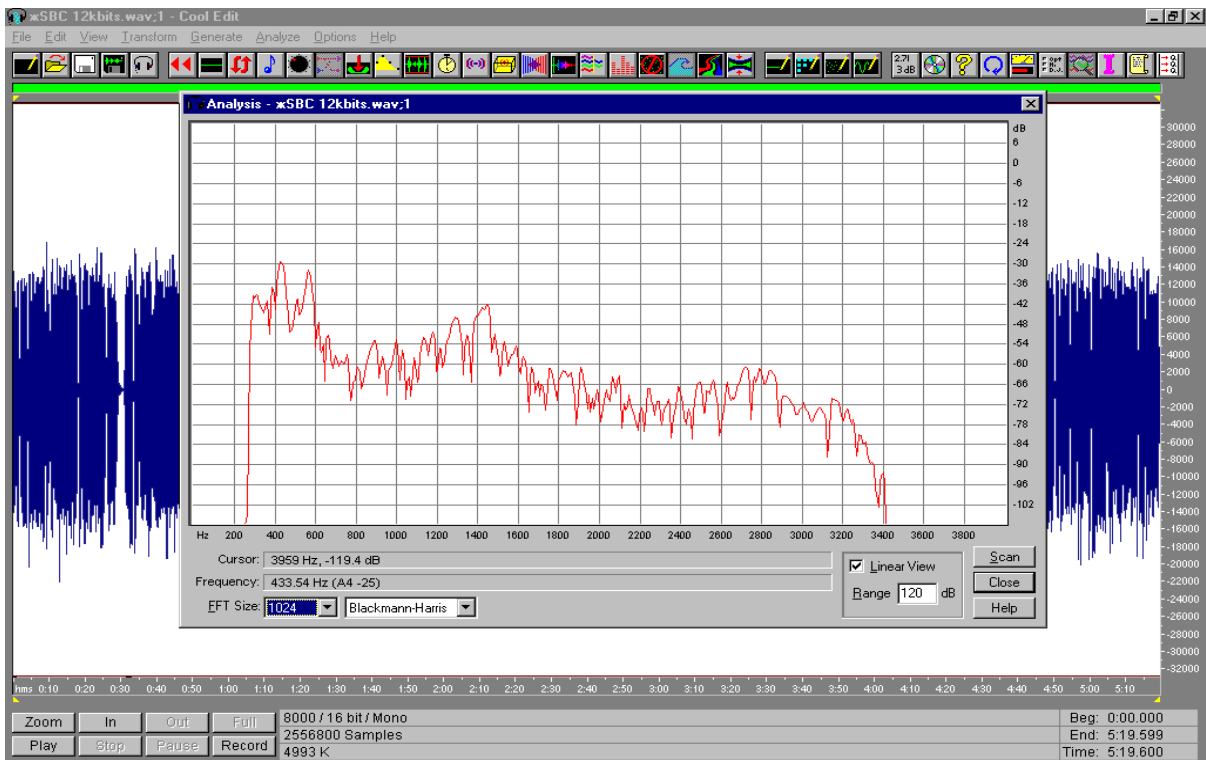


Рис. 4.12. Спектр женского речевого сигнала после обработки кодеком с цифровой скоростью 12 кбит/с.

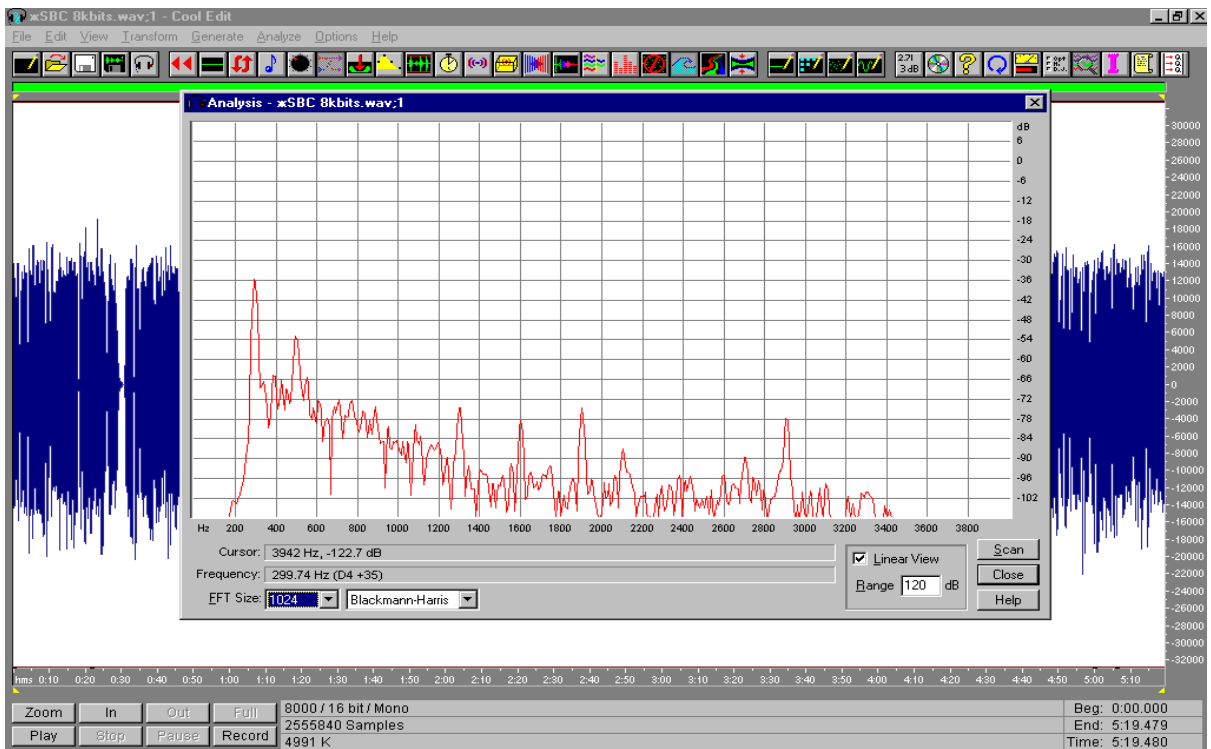
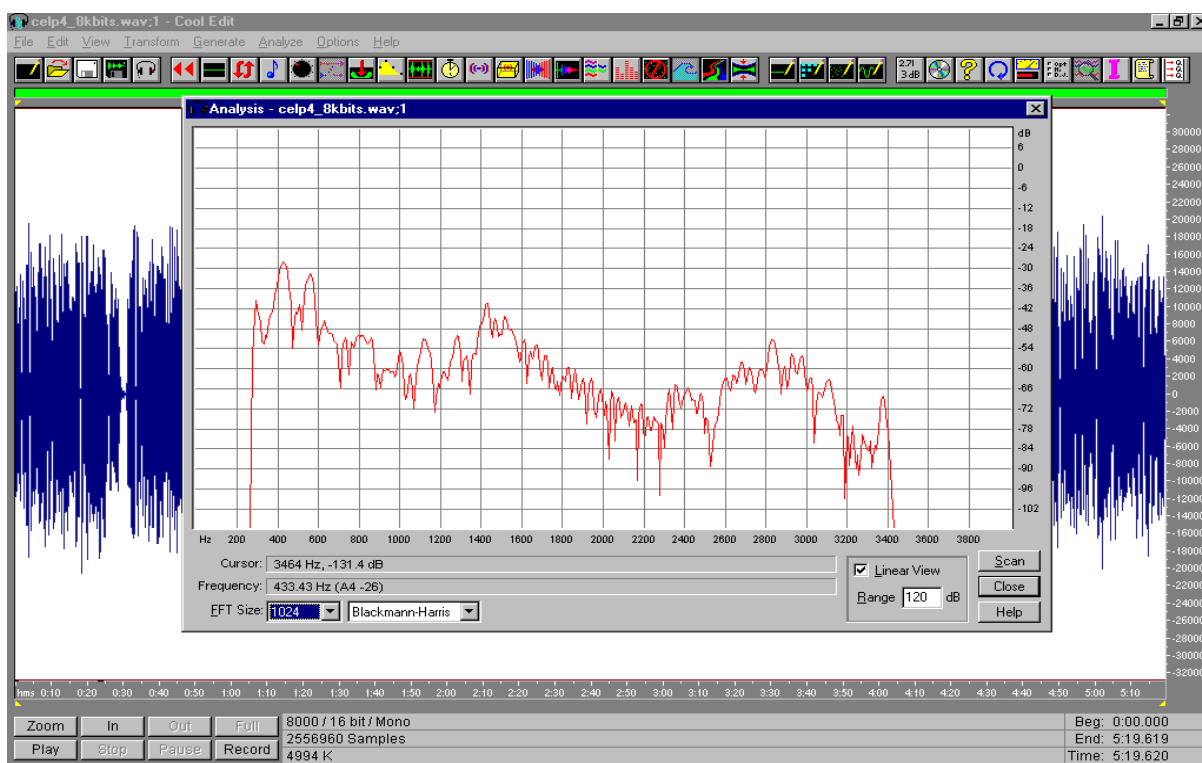


Рис. 4.13. Спектр женского речевого сигнала после обработки кодеком с цифровой скоростью 8 кбит/с.



**Рис. 4.14.** Спектр женского речевого сигнала после обработки кодеком с цифровой скоростью 4,8 кбит/с.

По результатам исследования изменения интегрального спектра речевого сигнала до и после обработки его кодеками с различной степенью сжатия можно сделать нижеследующие выводы.

Характер изменения интегрального спектра мужского и женского речевых сигналов примерно одинаков. Кодеки с высокой цифровой скоростью, т.е. с малой степенью сжатия, почти не изменяют интегральный спектр речевого сигнала. С увеличением степени сжатия растет искажение спектра обработанного речевого сигнала. При обработке кодеками с большим коэффициентом сжатия искажения становятся значительными.

Искажения в большей степени касаются области высоких частот, что неизбежно ухудшает на разборчивость обработанного речевого сигнала по сравнению с исходным.

Вышесказанное еще раз показывает, что с увеличением степени сжатия речевого сигнала падает разборчивость, а следовательно и субъективная абонентская оценка обработанного речевого сигнала.

Эти выводы хорошо коррелируются с выводами полученными в предыдущем разделе, и позволяют сделать заключение о том, что измерение изменения энергетических параметров является достаточным для формирования интегральных оценок качества обработки речевого сигнала кодеками с различной цифровой скоростью, т.е. использование ОСМ будет обеспечивать объективную оценку.

#### **4.2. Разработка алгоритмов коррекции речевого сигнала**

Наибольшую сложность при проектировании традиционных компенсаторов искажений, регулирующих коэффициент передачи тракта, вызывает определение оптимального времени восстановления исходного коэффициента передачи после окончания превышения уровня, так как предъявляемые к компенсатору искажений требования очень противоречивы:

- компенсатор искажений должен обеспечивать незаметность регулировки на слух;
- сжатие динамического диапазона;
- ограничение уровней превышающих допустимые;
- повышение  $R_{осм}$ .

При обработке речевых сигналов с помощью традиционных компенсаторов искажений выбирается, как правило, время восстановления порядка 0,3 сек. Незаметность регулировки на слух достигается снижением скорости регулирования, по результатам исследований проведенных в МТУСИ, даже звукорежиссеры не замечают изменения уровней, если скорость регулирования не превышает 1,25 дБ/с, т.е. временем восстановления больше 30 сек.

Такие параметры времени восстановления совершенно неприемлемы в наших условиях, так как значительно превышают среднюю длительность РС в системах СПРС. С учетом того, что наиболее вероятным участком работы компенсатора искажений на характеристике восстановления является та

область, где коэффициент передачи равен единице, без заметного ущерба удается уменьшить время восстановления до 8-12 с.

Как правило, время восстановления выбирается в пределах от нескольких миллисекунд до одной секунды, поскольку основным требованием к компенсаторам искажений является недопущение даже кратковременного превышения сигналом допустимого уровня, и время восстановления выбирается исходя из этих соображений.

При использовании компенсатора искажений с регулированием огибающей полученной путем синтеза ортогонального сигнала по Гильберту, возникает возможность изменения непосредственно пик-фактора сигнала без введения заметных на слух искажений, при этом инерционность определяется только свойствами сигнала и принятым способом регулирования. Проведенные исследования показали целесообразность оценки параметров сигнала:

- пик фактора;
- амплитудного значения;

на длительности порядка 20-40 мс до момента регулирования и тех же значений на той же длительности после момента регулирования, при скорости регулирования огибающей соответствующей изменению  $\mu$ -характеристики, на которую умножается огибающая входного сигнала, со скоростью не более 0,4 единицы  $\mu$  за 5 мс.

В составе компенсатора искажений ограничитель используется зачастую как сжиматель. Для повышения эффективности его действия в этом режиме желательно уменьшение времени восстановления. Такая возможность появляется при совместном использовании ограничителя и автостабилизатора, время восстановления 0,3-0,6 с приближает ограничитель по свойствам к сжимателю.

Компенсатор искажений на выходе тракта формирования программ не должен пропускать самых кратковременных превышений номинального

уровня, для чего он дополняется пикосрезателем, который неизбежно вносит кратковременные искажения.

При реализации компенсатора искажений с регулированием по огибающей возможна мгновенная компрессия сигнала без внесения заметных искажений формы, что позволяет реализовать пикосрезатель, близкий к идеальному.

Таким образом, использование ограничения огибающей позволяет избежать обогащения спектра сигнала новыми спектральными составляющими, хотя и приводит к появлению заметности изменений сигнала и желательности его использования в традиционном “сторожевом” режиме.

В то же время следует отметить, что удастся поддерживать заданный уровень превышения номинального, +1 дБ, во всех случаях регулирования, даже при существенных его превышениях во входном сигнале.

При заниженных уровнях сигналов или РС с высокой Росм возникает необходимость их обработки с помощью экспандера, поэтому он вводится в состав компенсатора искажений. Порог срабатывания выбирается в зависимости от уровня шумов и устанавливается на 33-38 дБ ниже номинального уровня в звуковом вещании и на 6-10 дБ выше при телевизионном вещании. При достижении определенного уровня экспандер отключается, с временем отключения 4-6 с, порог при этом устанавливается на 18 дБ ниже нормированного значения, хотя практически подбирался опытным путем.

Так как экспандер поднимает низкие уровни вместе с уровнем шумов, а в паузах снижает коэффициент передачи через какое-то время, то в традиционных компенсаторах искажений используется, как правило, простой пороговый шумоподавитель. Время восстановления около 2 мс, а время срабатывания не менее 2 с., при меньших временах «откусывается» процесс реверберации. Для речи это время велико и для нее такой шумоподавитель бесполезен.

Введение режима шумоподавления по огибающей показало возможность адаптивного ограничения уровня шумов в паузе без внесения искажений в сигналы малого уровня, но модуляция шумов сигналом регулирования, хотя и менее заметная, чем в традиционных регуляторах остается. Проведенные в акустическом центре МТУСИ прослушивания показали возможность существенного ограничения шумов паузы при отсутствии заметных искажений типа отсечка снизу для сигналов малых уровней. В то же время отмечено, что повышение относительной средней мощности сигналов высокого уровня воспринимается слушателями как расширение динамического диапазона сигнала с соответствующим уменьшением заметности шумов, введение же участка шумоподавления, приводящее к модуляции шумов огибающей сигнала отрицательно сказывается на его оценке слушателем в целом.

На основании приведенных значений параметров регулятора конкретизирован алгоритм регулирования РС, приведенный ниже.

Исходные посылки к организации алгоритма:

- регулирование не должно вносить в сигнал изменений, заметных слушателю;
- контрасты громкости происходят, как правило, при максимальном уровне сигнала;
- основное отличие сигналов при этом определяется их различным спектральным составом, определяющим пик-фактор, а, следовательно, средней мощностью;
- регулирование должно привести к повышению средней мощности сигнала;

То есть обязательно обеспечение:

- безынерционного ограничения, компрессирования и компандирования вещательных сигналов при отсутствии обогащения их спектра;
- значительного повышения ОСМ сигнала;
- выравнивания громкости входного сигнала, то есть адаптивного



регулирования по громкости;

- расширения громкостного динамического диапазона.

Для обеспечения указанных задач в способе автоматического регулирования пиковых значений электрических вещательных сигналов на заданный уровень при стабилизации относительной средней мощности, включающем в себя операции преобразования входного аналогового сигнала в цифровую последовательность и управления коэффициентом передачи звена в канале вещательного сигнала, причем сигнал управления вырабатывают из входного и выходного сигнала, для чего выделяют огибающую сигнала, осуществляют ее фильтрацию, а регулирование коэффициента передачи по заданному закону выполняют при превышении восстановленным сигналом определенного порогового уровня.

Входную цифровую последовательность подвергают регулировке медленным идеальным компенсатором искажений. Далее на последовательность накладывают оконную функцию. Затем сигнал проходит блок фильтров, где происходит фильтрация низкочастотного и высокочастотного сигналов, которые отдельно проходят дальнейшую обработку. Далее из цифровой последовательности  $Z(U)_{вх}$ , с помощью быстрого преобразования Фурье, формируют ортогональный сигнал, накладывая на него и на сигнал компенсирующие окна, из которого выделяют огибающую и косинус мгновенной фазы сигнала, огибающую разделяют на низко и высокочастотные составляющие, которые отдельно регулируют под воздействием сигнала управления, после чего огибающую восстанавливают суммированием составляющих и получают выходную цифровую последовательность  $Z(U)_{вых}$  при перемножении восстановленной огибающей с косинусом мгновенной фазы.

В этом случае сигнал управления формируют, с одной стороны, при сравнении цифровых пиковых уровней сигнала  $Z(U)_{вх}$  с цифровым пороговым уровнем  $\Pi(U)1$ , а, с другой стороны, при сравнении цифровых значений входного  $Z(U)_{вх}$  и выходного  $Z(U)_{вых}$  сигнала с другим

пороговым цифровым уровнем  $\Pi(U_2)_2$ , таким образом, что при выполнении неравенства  $Z(U_2)_{вх} > \Pi(U)_1$ , сигнал управления изменяет коэффициент передачи, включая операцию экспандирования огибающей, если  $Z(U_2)_{вх} > \Pi(U_2)_2$ , или операцию ее компрессирования, если  $Z(U_2)_{вх} < \Pi(U_2)_2$  причем степень экспандирования или компрессирования определяют в соответствии с величиной разности  $Z(U_2)_{вх} - \Pi(U_2)_2$  и  $Z(U_2)_{вых} - \Pi(U_2)_2$ , а при выполнении неравенства  $Z(U)_{вх} < \Pi(U)_1$  сигналом управления устанавливаются коэффициент передачи равный единице, где  $Z(U_2)_{вх}$  и  $Z(U_2)_{вых}$  – значения относительной средней мощности последовательностей  $Z(U)_{вх}$  и  $Z(U)_{вых}$  соответственно, на временном интервале выборки,  $\Pi(U_2)_2 = kZ(U_2)_{вх}$ , причем величину коэффициента  $k$  определяют в соответствии с требованиями к качественным характеристикам выходного аналогового сигнала.

Исходя из полученных данных, анализируя принятые нами во внимание параметры речевого сигнала, а также исходя из общих требований к устройствам обработки речевого сигнала и их особенностей, рассмотренных в первой главе, перейдем к разработке алгоритма предварительной и восстановительной обработки РС.

На базе параметрического представления вещательного сигнала разработан алгоритм предварительной обработки и восстановительной коррекции, который теоретически должен обеспечить:

- повышение относительной средней мощности сигнала вещания – за счет идеального поддержания пикового уровня и перераспределения мощностных (громкостных) соотношений в сигнале. За счет возможности проведения регулировки в пределах одной громкостной градации не нарушаются громкостные соотношения;

- уменьшение смещений доминирующих в вещательном сигнале частот достигается введением компенсирующих частотных обработок сигнала управления, формирующего амплитудную характеристику преобразователя аналитической огибающей;

- уменьшение заметности искажений спектрального состава сигнала вещания, достигается за счет перераспределения крутизны процессов его нарастания и спада, что сопровождается соответствующим перераспределением амплитуд спектральных составляющих;
- уменьшение заметности повышения шумов и искажений, достигается за счет увеличения громкости полезного сигнала относительно шума и сигналов малого уровня (соответствующих акустическим шумам на входе, сигналам, отображающим акустическую обстановку в точке записи, сигналам придыхания и т.д.), что субъективно воспринимается как увеличение динамического диапазона сигнала;
- повышение крутизны переднего фронта и уменьшение затягивания спада сигнала достигаются за счет соответствующей обработки аналитической огибающей на интервалах нестационарности вещательного сигнала;
- уменьшение перераспределения акцентов звучания мелодических и амплитудных ритмических характеристик сигнала в сторону более высокочастотных, достигается перераспределением громкостных соотношений в сигнале, приближающих его к исходному – ритмически более низкочастотному.

Как показал анализ алгоритмов компактного представления звуковых сигналов, в процессе этих преобразований претерпевают изменения временные, динамические и частотные характеристики сигнала, что, в конечном итоге, не может не отразиться на качестве декомпрессированного (восстановленного) сигнала.

Методика предварительной обработки и восстановительной коррекции описана и обоснована в первой части данной работы. Предлагается следующая последовательность операций для реализации этой методики:

- представление исходного сигнала в цифровом виде в формате импульсно-кодовой модуляции;
- формирование из исходной последовательности звх с помощью N

точечного преобразования Гильберта сигнала, ортогонального исходному, то есть сопряженного с ним по Гильберту;

- формирование гильбертовской огибающей  $S(t)$  и косинуса мгновенной фазы  $\cos(t) = z_{вх} / S(t)$  из исходного  $z_{вх}$  и ортогонального сигналов;
- адаптивное формирование сигнала управления в зависимости от пикового значения и ОСМ входного сигнала;
- разделение огибающей  $S(t)$  на низкочастотную (НЧ)  $S_{нч}(t)$  и высокочастотную (ВЧ)  $S_{вч}(t)$  составляющие;
- регулирование НЧ-составляющей  $S_{нч}(t)$  и ВЧ-составляющей  $S_{вч}(t)$  в регулирующем звене, амплитудная характеристика которого в зависимости от полярности и величины сигнала управления является компрессирующей или экспандирующей. Если сигнал управления равен нулю, то амплитудная характеристика - линейная;
- восстановление огибающей путем суммирования сформированных НЧ- и ВЧ-составляющих:  $S_{вст}(t) = S_{нч.вст}(t) + S_{вч.вст}(t)$ ;
- получение выходной цифровой последовательности путем выполнения операции перемножения  $z_{вых} = S_{вст}(t)\cos(t)$ .

Предполагается реализовать единый, применимый как для предварительной обработки так и для восстановительной коррекции речевого сигнала. Специфику же предварительной обработки и восстановительной коррекции предполагается задавать в виде параметров. Такой подход логически вытекает из подобия предложенных методов обработки и совпадения основных операций предварительной обработки и восстановительной коррекции речевого сигнала.

В разработанном алгоритме происходит преобразование Фурье и формирование гильбертовской огибающей и мгновенной фазы, скажем несколько слов об этих преобразованиях.

Понятие огибающей и мгновенной частоты вводятся для пары сигналов: исходного  $Z(t)$  и сопряженного с ним по Гильберту  $\bar{Z}(t)$  причём:

$$\bar{Z}(t) = \frac{1}{\pi} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \frac{Z(t1)}{t - t1} dt1 \quad (2)$$

$$Z(t) = -\frac{1}{\pi} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\bar{Z}(t1)}{t - t1} dt1 \quad (3)$$

Преобразование Гильберта – распространённое линейное преобразование; с точки зрения спектрального анализа оно ставит сигнал

$$\text{вида } Z(t) = \sum Ck \cdot \cos(\omega k \cdot t + \varphi k) \quad (4)$$

в соответствие

$$\bar{Z}(t) = \sum Ck \cdot \sin(\omega k \cdot t + \varphi k) \quad (5)$$

т.е. переводит сумму косинусов в сумму синусов с сохранением амплитуд и фазовых углов. Эта операция в электрических цепях выполняется фазовращателями.

Сигналы  $Z(t)$  и  $\bar{Z}(t)$  имеют одинаковые амплитудные, но разные фазовые спектры – все спектральные составляющие сигнала  $\bar{Z}(t)$  отстают от одноименных составляющих сигнала  $Z(t)$  на  $90^\circ$ . Мощность обоих сигналов одинакова.

Преобразование Гильберта позволяет любой звуковой сигнал представить произведением двух функций – огибающей и косинуса фазы:

$$Z(t) = A(t) \cdot \cos \varphi(t) \quad (6)$$

$$\text{где } A(t) = \sqrt{Z^2(t) + \bar{Z}^2(t)}, \quad \varphi(t) = \arctg \frac{\bar{Z}(t)}{Z(t)} \quad (7),(8)$$

Дискретным преобразованием Фурье (ДПФ) называется преобразование вида:

$$X(k) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} X(n) \cdot \left( \cos \frac{2\pi nk}{N} - j \sin \frac{2\pi nk}{N} \right) \quad (9)$$

где  $X(k)$  – частотный коэффициент;  $N$  – длина выборки;  $n$  – текущий номер;  $X(n)$  – отсчёт исходной дискретной последовательности;  $k$  – номер коэффициента.

Обратным дискретным преобразованием Фурье (ОДПФ) называется преобразование вида:

$$X(n) = \sum_{k=0}^{N-1} X(k) \cdot \left( \cos \frac{2\pi nk}{N} + j \sin \frac{2\pi nk}{N} \right) \quad (10)$$

Быстрое преобразование Фурье (БПФ) – это не разновидность преобразования Фурье, а название целого ряда эффективных алгоритмов, предназначенных для быстрого вычисления дискретно-временного ряда Фурье. Основная идея БПФ – деление  $N$ -точечного дискретно-временного ряда Фурье (ДВРФ) на два и более меньших ДВРФ, каждый из которых можно вычислить отдельно, а затем линейно просуммировать с остальными, с тем, чтобы получить ДВРФ исходной  $N$ -точечной последовательности.

$$S(n) = \sum_{k=0}^{N-1} s(k) \cdot \left[ \cos \frac{2\pi}{N} nk - j \sin \frac{2\pi}{N} nk \right], n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (11)$$

В общем случае вычисление  $N$ -точечного ДВРФ требует выполнения  $\log_2 N$  шагов с операциями сложения и  $N/2$  операциями умножения на каждом шаге. Таким образом,  $N$ -точечное БПФ требует выполнения примерно  $N \log_2 N$  сложений и  $N \log_2(N/2)$  умножений комплексных чисел, что значительно меньше тех  $N^2$  операций, которые необходимы для отдельного вычисления  $N$  значений преобразования по  $N$ -точечной последовательности данных. Если используется дополнение нулями, то за счет исключения (или удаления) вычислительных путей, содержащих одни лишь нулевые значения, можно достичь еще большего уменьшения объема вычислений.

БПФ эффективно в вычислительном отношении и обеспечивает получение приемлемых результатов для большого класса сигнальных процессов.

Чтобы эффективно обрабатывать исходный звуковой сигнал в частотной области, его необходимо с минимальными искажениями преобразовать в цифровой и затем получить максимально точную оценку спектра на коротком временном отрезке, т.е. на короткой выборке. Почему выборка должна быть короткой? Потому, что увеличение длины выборки связано, с одной стороны, с увеличением памяти буферного устройства, а с другой – с задержкой исходного (обрабатываемого) сигнала при его передаче по линиям связи.

Исходя из поставленной задачи и характеристик окон предпочтение было отдано окну Наттола.

В процессе регулирования производится измерение пикового значения вещательного сигнала и его ОСМ (на длительности от 40 мс для информационного вещания) до и после регулирования. При превышении пиковым значением сигнала заданного порога осуществляется оценка ОСМ выходного сигнала и, в случае его отклонения от заданной величины огибающие умножаются на компрессирующую или экспандирующую амплитудную характеристики, а также на характеристику идеального ограничителя. При этом изменение амплитудной характеристики в указанном интервале времени обеспечивает незаметность процесса регулирования.

Таким образом, алгоритм автоматического регулирования пиковых значений электрических вещательных сигналов на заданный уровень при стабилизации относительной средней мощности структурно содержит: блок фильтров, КОМПЕНСАТОР ИСКАЖЕНИЙ, БПФ, блок выделения огибающей, блок сигнала управления снабженный двумя входами для подключения входного и выходного сигналов устройства, а так же два входа для ввода значений ОСМ и Рпик, схема коррекции коэффициента передачи и пороговый вход устройства, блоки регулирования коэффициента передачи, блоки аналого-цифрового и цифро-аналогового преобразования, блок разделения огибающей на низко- и высокочастотную составляющие, измеритель коэффициента передачи, блок восстановления огибающей, блок восстановления сигнала, блоки регулирования коэффициента передачи, включенные в тракты низко- и высокочастотных составляющих огибающей, идеальный пиковый ограничитель.

### **4.3 Описание структурной схемы алгоритма**

Структурная схема соответствующего алгоритма обработки речевого сигнала

представлена на Рис. 2.2.

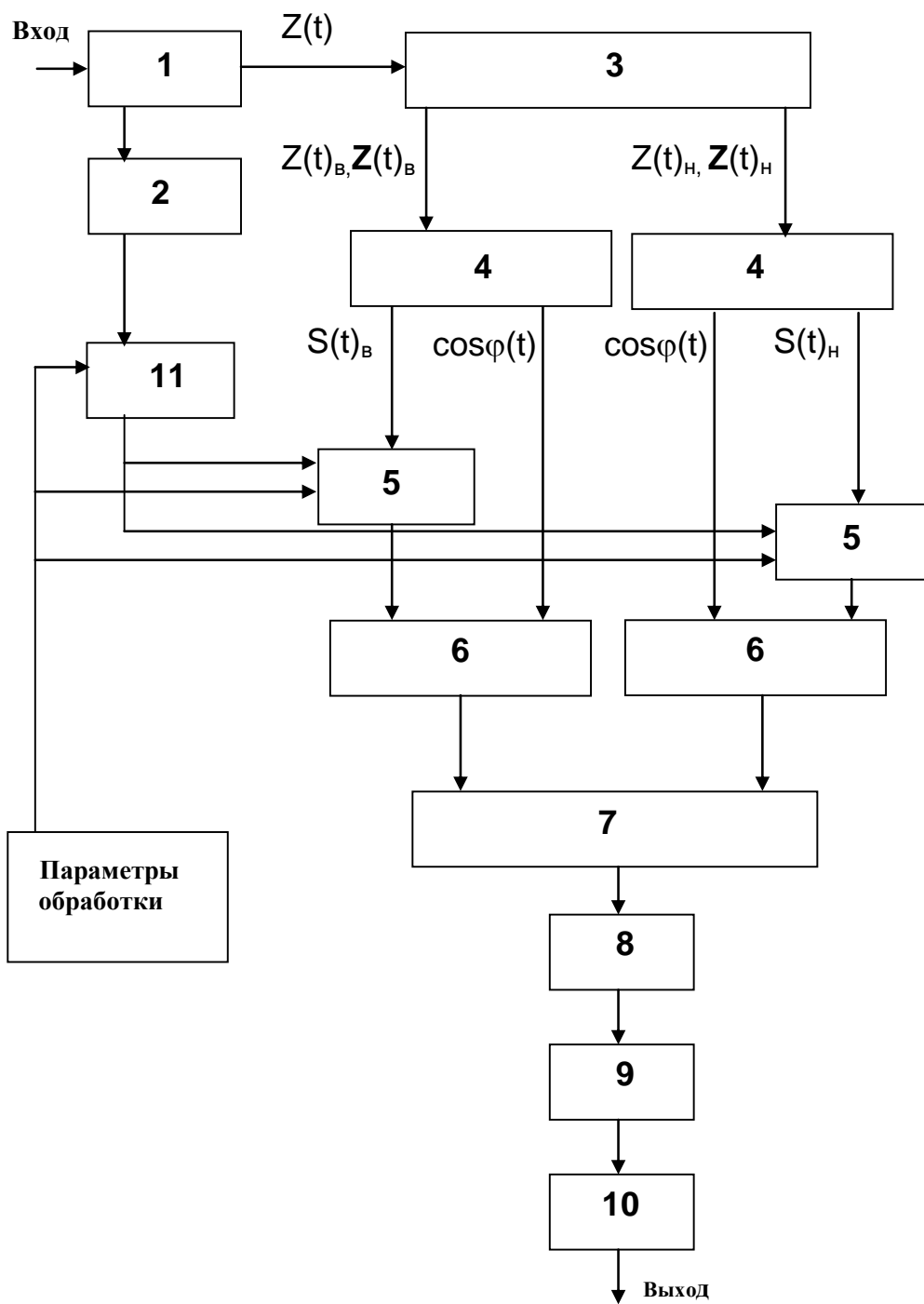


Рис. 2. Структура алгоритма обработки РС.

Указанная структурная схема содержит:

1. блок ввода сигнала (из аналого-цифрового преобразователя);



2. блок подсчета параметров сигнала;
3. блок разделения сигнала на низко- и высокочастотную составляющие и формирования ортогонального сигнала;
4. блок выделения огибающей и косинуса мгновенной фазы сигнала (для ВЧ и НЧ составляющих);
5. блок регулирования коэффициента передачи огибающей (для ВЧ и НЧ составляющих);
6. блок восстановления сигнала по огибающей и косинусу мгновенной фазы сигнала (для ВЧ и НЧ составляющих);
7. блок восстановления сигнала из ВЧ и НЧ составляющих;
8. блок выходного фильтра;
9. блок абсолютного ограничения;
10. блок вывода сигнала (в цифро-аналоговый преобразователь, цифровой канал или файла);
11. блок формирования сигнала управления.

Предполагается, что РС обрабатывается выборками длительностью около 100 мс. Обработка происходит в реальном масштабе времени с систематической задержкой 4 выборки (то есть около 400 мс).

Входной вещательный сигнал вводится блоком 1 из аналого-цифрового преобразователя или адаптера цифрового канала. Для отладочных и исследовательских целей предусматривается возможность ввода входного сигнала из файла. Полученная цифровая последовательность  $Z(U)_{вх}$  подается на вход блока 3. В этом блоке сигнал разделяется на низкочастотную  $Z_{ни}$  высокочастотную  $Z_{вс}$  составляющие а также формируется ортогональный сигнал для каждой из составляющих. Формирование ортогонального сигнала осуществляется с помощью специальной, вычислительно достаточно простой, процедуры синтеза такого сигнала в частотной области на основе БПФ. В блоке 3 предусматривается возможность коррекции АЧХ сигнала, что легко осуществимо на этапе представления сигнала в частотной области. В блоках 4

производится выделение огибающей  $S(t) = \sqrt{Z^2(U)_{вх} + Z^2(U)_{вх}}$  и косинуса мгновенной фазы  $\cos\varphi(t) = [S(t)/Z(U)_{вх}]$  сигнала. Огибающая регулируется в блоках 5 под воздействием сигнала управления, поступающего от блока 11. В блоках 6 восстанавливаются НЧ и ВЧ составляющие путем перемножения отрегулированной огибающей и косинуса мгновенной фазы. В блоке 7 из ВЧ и НЧ составляющих формируется выходной сигнала. В блоке 8 производится фильтрация, а в блоке 9

абсолютное ограничение выходного сигнала. Блок 10 передает выходной сигнал в цифро-аналоговый преобразователь или адаптер цифрового канала. Для отладочных и исследовательских целей предусматривается возможность вывода сигнала в файл. В блоке 2 производится измерение пиковых значений входного сигнала  $|z_{вх}|_{\max}$  и ОСМ выходного сигнала РОСМ.вых. Измерения производятся последовательно на каждом временном отрезке, длительность которого устанавливают в пределах от 40 мс до 160 мс конкретное значение предполагается подбирать, руководствуясь требованиями к качественным характеристикам выходного сигнала. Блок 11 вырабатывает сигнал управления, определяющий амплитудную характеристику регулирующего звена. При превышении пиковым значением входного сигнала  $|z_{вх}|_{\max}$  заданного порога  $z_{пор}$  и в случае отклонения РОСМ.вых от заданной величины РОСМ.пор, в результате регулирования, НЧ составляющая огибающей умножается либо на компрессирующую (если РОСМ.вых < РОСМ.пор), либо на экспандирующую (если РОСМ.вых > РОСМ.пор) амплитудную характеристику регулирующего звена. При этом ВЧ составляющая огибающей изменяется по линейному закону пропорционально изменению НЧ составляющей на интервале регулирования.

Коэффициент регулирования можно представить как произведение  $K_i = K_{Ai} \cdot K_{Si}$ .  $K_{Ai}$  вычисляется по модифицированной  $\mu$ -характеристике:

$$K_{Ai} = \begin{cases} \frac{1}{a_i} \left( a_i r + (1-r)L_0 \frac{\ln\left(1 + \frac{\mu_i a_i}{L_0}\right)}{\ln(1 + \mu_i)} \right), & a_i \neq 0, \mu_i > 0 \\ \frac{1}{a_i} \left( a_i r + (1-r) \frac{L_0}{|\mu_i|} \left( \exp\left(\ln(1 + |\mu_i|) \frac{a_i}{L_0}\right) - 1 \right) \right), & a_i \neq 0, \mu_i < 0 \end{cases}, \text{ где } a_i - \text{отсчеты}$$

пропущенной через фильтр нижних частот огибающей сигнала,  $r$ - коэффициент,

определяющий величину линейного участка  $r = \exp\left(-\frac{a_i^2}{c}\right)$ ,  $L_0$  – номинальное значение амплитуды сигнала, соответствующее нулевому уровню,  $c$  – константа, значения  $\mu_i$

определяются рекуррентным выражением  $\mu_i = \mu_{i-1} + \frac{(M_k - \mu_{i-1})}{n}$ ,  $n$  – количество отсчетов на интервале интерполяции,  $k$  – номер текущей выборки,

$$M_k = \begin{cases} M_{k-1} + |m_k - m_{\text{порог}}| \left( \frac{1}{n_3^{\text{in}}} (p_k^{\text{in}} - p_{\text{порог}}^{\text{in}}) + \frac{1}{n_3^{\text{out}}} (p_k^{\text{out}} - p_{\text{порог}}^{\text{out}}) \right), & m_k \geq m_{\text{порог}} \\ M_{k-1} + \frac{1}{n_3} \frac{M_{k-1}}{|M_{k-1}|} (p_k^{\text{in}} - p_{\text{порог}}^{\text{in}}), & m_k < m_{\text{порог}} \end{cases},$$

где  $m_k$ ,  $p_k$  – максимальное значение и пик-фактор сигнала на выборке,  $m_{\text{порог}}$ ,  $p_{\text{порог}}$  – их пороговые значения,  $n_3$  – коэффициенты, определяющие скорость изменения параметров. Умножение исходного сигнала на коэффициент  $K_{Ai}$  обеспечивает выравнивание ОСМ сигнала в соответствии с заданным значением  $p_{\text{порог}}$ . Общий вид характеристики регулирования времени приведен на рис. 10. Цифрой «1» обозначена обычная  $\mu$ -характеристика, цифрой «2» - модифицированная введением начального линейного участка. Для того чтобы гарантировать отсутствие превышения уровня +1 дБ, введен дополнительный коэффициент  $K_s$ . В случае необходимости обеспечения высоких значений ОСМ РС,  $K_s$  задается, как характеристика амплитудного ограничителя.

$$K_{Si} = b_k h_i + b_{k-1} h_{n-i}, \quad b_k = \begin{cases} \frac{L_{\text{Доп}}}{\max\{s_i\}_k}, & \max\{s_i\}_k > L_{\text{Доп}} \\ 1, & \max\{s_i\}_k \leq L_{\text{Доп}} \end{cases},$$

где  $L_{\text{Доп}}$  – максимально допустимое значение отсчета сигнала,  $n$  – количество отчетов на выборке,  $k$  – номер выборки,  $h_i$  – отсчеты самокомпенсирующейся оконной функции.

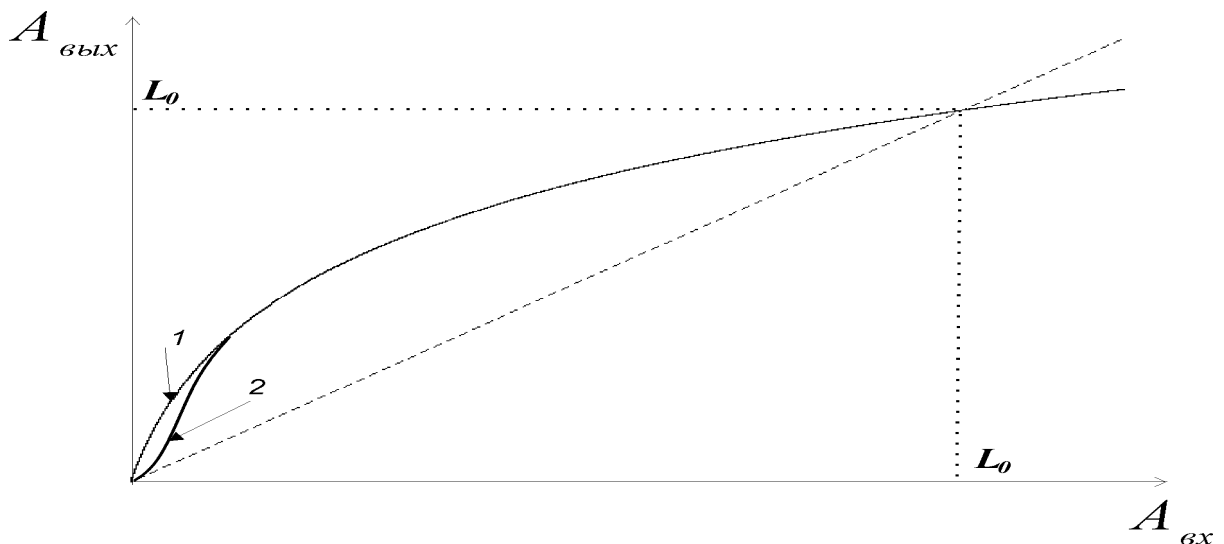


Рис. 10. Характеристика регулирования

Эффект повышения средней мощности сигнала достигается за счет модуляции компонентов сигнала сигналом регулирования форма которого, подобна форме НЧ огибающей сигнала. Высокая скорость регулирования позволяет обрабатывать каждый звуковой объект отдельно, исключая грубые

искажения фаз атаки и поддержки. На рис. 11. приведены осциллограммы РС обработанных с помощью разработанного ПВК и инерционным АРУР.

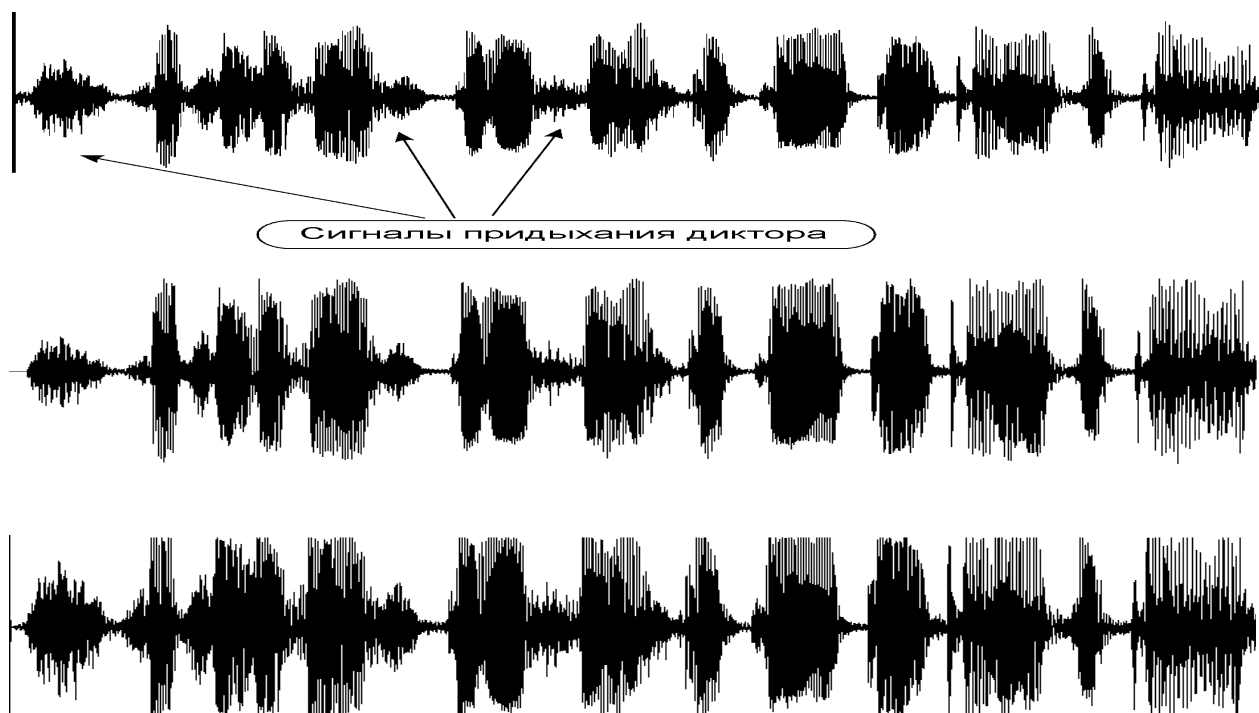


Рис. 11. Осциллограммы РС а) - входной РС; б) - РС после регулирования разработанным методом; в) - РС после обработки классическим регулятором уровня.

## Выводы

Сформированы требования к алгоритму обработки РС обеспечивающие компенсацию искажений в канале с многократным кодированием. Определено, что существующие методы не позволяют формировать сигнал управления и проводить обработку со скоростью следования звуковых объектов – фонем. Определено, что практически безынерционное регулирование возможно с использованием аналитической огибающей сигнала. Разработана структурная схема и ПО (приложение1) для реализации алгоритма. Проведенные испытания подтвердили его эффективность.

## ГЛАВА 5. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМА ОБРАБОТКИ РС

### 5.1 Исследование искажений РС в канале СПРС с многократным преобразованием

Рассмотрим эффективность предложенных методов предварительной и восстановительной коррекции речевого сигнала. Для этого проведем сравнительные исследования деградации статистических параметров речевого сигнала на примере отрывка речевой вещательной передачи радиостанции "МАЯК", кодированного основными алгоритмами сжатия информации, используемыми в СПРС. Будем сравнивать изменения параметров речевого сигнала, таких, как ОСМ, спектральные характеристики, крутизна атак при обработке сигнала предложенным алгоритмом, и без него. Для этих целей будем использовать пакет программ COOL Edit, программу сжатия аудиоданных AudioLab, программу сравнительных оценок параметров звуковых файлов NewEstim. Отрывок радиовещательной программы "Маяк" был обработан полосовым фильтром 300–3400 Гц для имитации прохождения сигнала по телефонному каналу. Затем были проведены оценки изменения ОСМ и спектральных параметров сигнала, сжатого речевыми кодеками с различными скоростями по отношению к исходному сигналу, а также по отношению к сигналу, обработанному АРГО. Для данного исследования были выбраны кодеки с алгоритмом CELP и скоростями 16, 8 и 4.8 кбит/с. Алгоритм CELP был выбран как стандартный алгоритм кодирования с линейным предсказанием, являющийся основой для специализированных алгоритмов, применяющихся в различных стандартах подвижной радиосвязи. Дадим краткое описание алгоритма:

При кодировании с линейным предсказанием (LPC) моделируются различные параметры человеческой речи, которые передаются вместо отсчетов или их разности, требующих значительно большей пропускной способности

канала. LPC работает с блоками отсчетов, а не с отдельными отсчетами, как ИКМ или АДИКМ. Для каждого блока алгоритм LPC вычисляет и передает частоту основного тона, его амплитуду, флаг речевого или шумового происхождения сигнала и другие параметры.

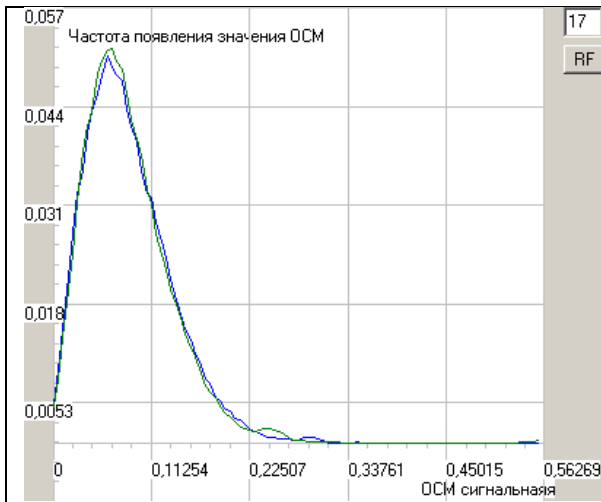
Первые реализации LPC, такие как LPC-вокодер, способствовали передаче данных на низких скоростях - 2,4 и 4,8 Кбит/с. При этом обеспечивался приемлемый уровень разборчивости речи, но качество, естественность и распознаваемость оказались недостаточными. Кроме того, такие кодеки не подходят для сигналов неречевого происхождения, попадающих в звуковую полосу частот, например сигналов модема.

Более сложные алгоритмы на базе LPC комбинируют LPC с элементами кодирования формы сигнала (КФС). Эти алгоритмы используют замкнутый LPC-кодер (называемый также "анализ через синтез" AbS), который характеризуется исчерпывающей самооптимизирующейся процедурой поиска. Ее выполняет аппаратура передачи, которая находит наилучшую аппроксимацию каждого речевого сегмента. Как только такая аппроксимация определена, представляющий ее код передается на приемную сторону, где используется для реконструкции оригинального аналогового сигнала.

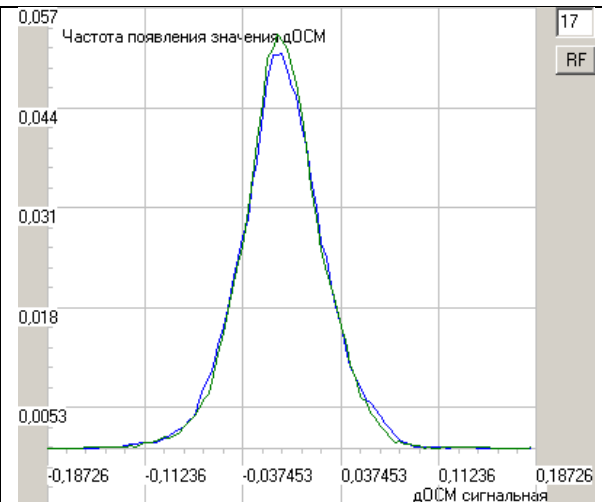
Примеры стандартных замкнутых LPC-алгоритмов - это метод линейного предсказания с кодовым возбуждением CELP, применяемый в СПСС GLOBALSTAR;

Результаты приведены на графиках, следующих ниже, и сведены в итоговую таблицу.

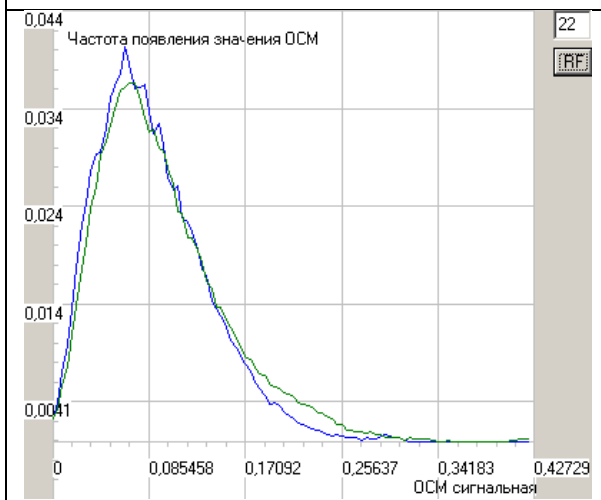
Вначале проанализируем изменение энергетических и спектральных параметров необработанного сигнала при прохождении его через кодеки CELP со скоростями 16, 8 и 4.8 Кбит/с. На графиках синим цветом показаны характеристики исходного сигнала, зеленым – сигнала при прохождении через кодек.



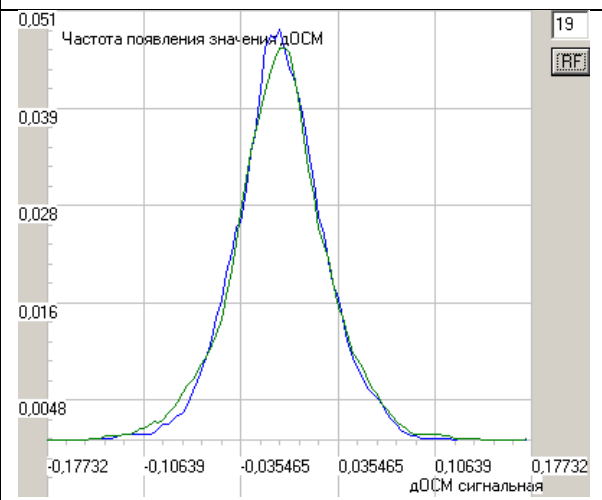
Сигнал без дополнительной обработки 16 кбит/с. Распределение OSMc



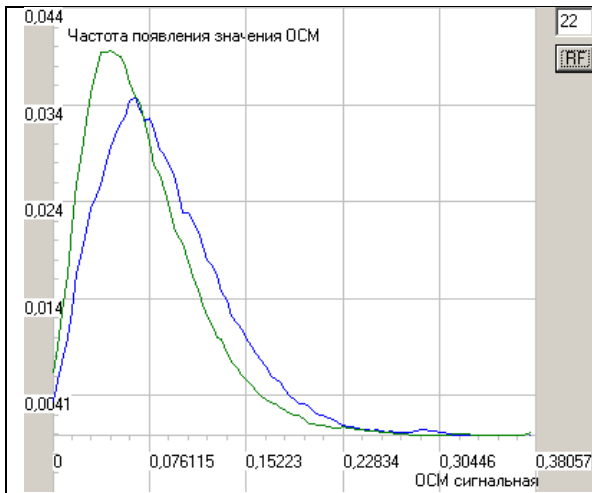
Сигнал без дополнительной обработки 16 кбит/с. Распределение dOSMc



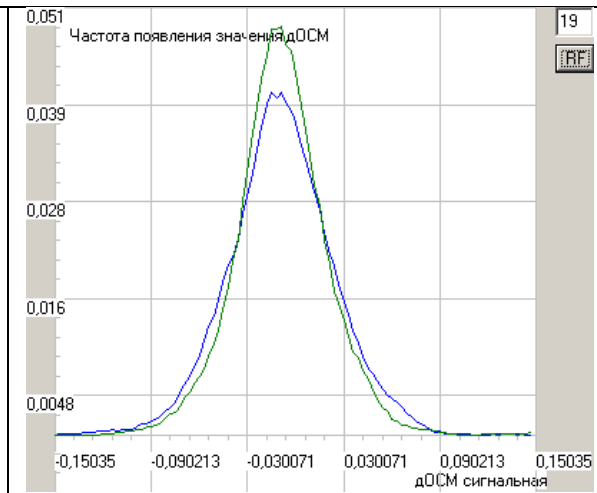
Сигнал без дополнительной обработки 16 кбит/с. Распределение OSMk



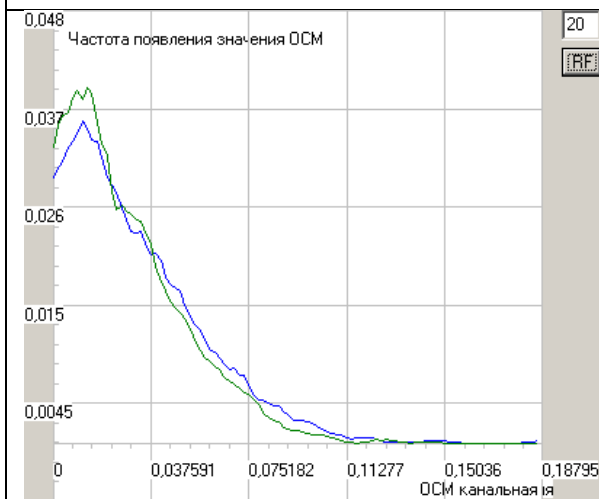
Сигнал без дополнительной обработки 16 кбит/с. Распределение dOSMk



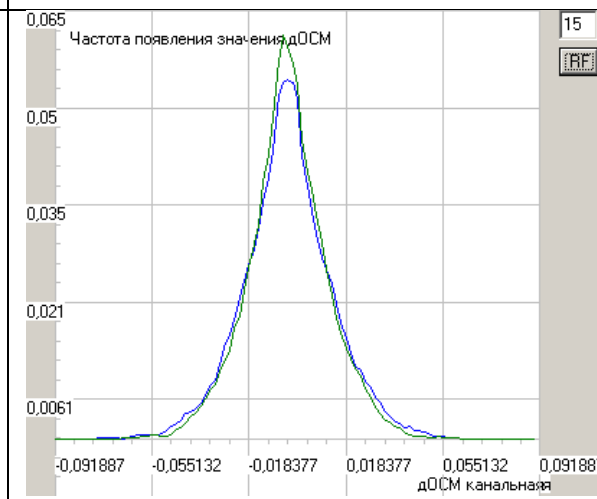
Сигнал без дополнительной обработки 8 кбит/с. Распределение OSMс



Сигнал без дополнительной обработки 8 кбит/с. Распределение dOSMс

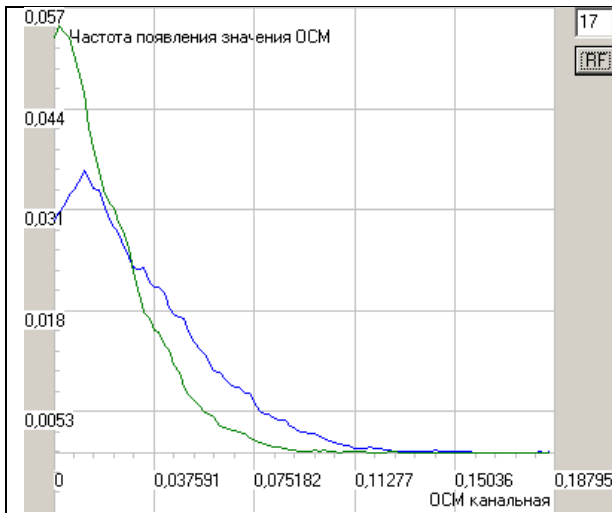


Сигнал без дополнительной обработки 8 кбит/с. Распределение OSMк

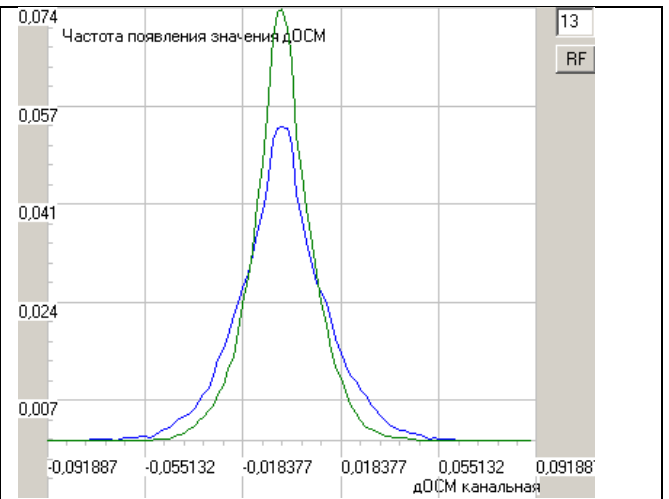


Сигнал без дополнительной обработки 8 кбит/с. Распределение dOSMк

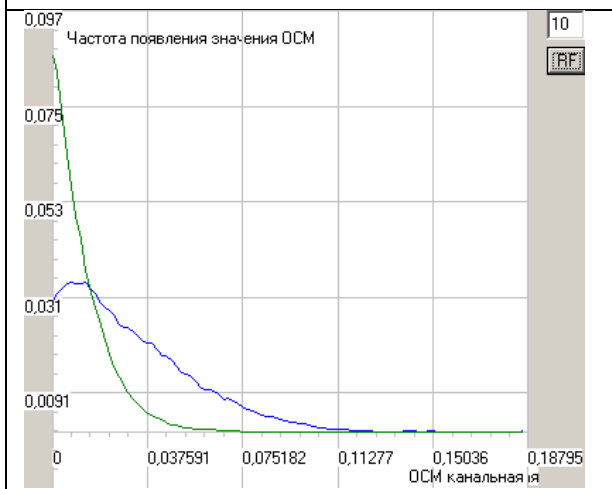




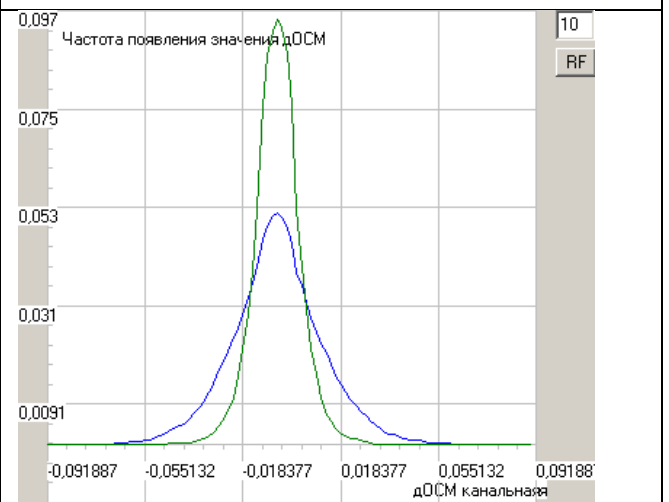
Сигнал без дополнительной обработки 4.8 кбит/с. Распределение OSMc



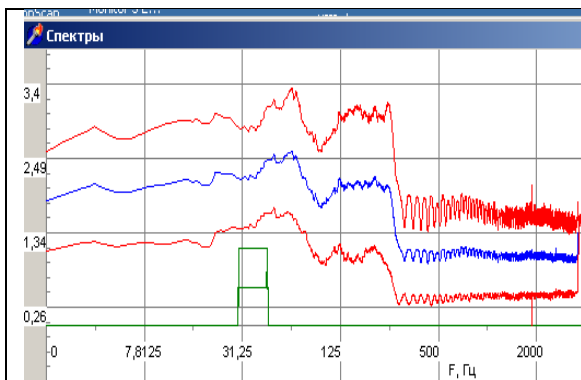
Сигнал без дополнительной обработки 4.8 Кбит/с. Распределение dOSMc



Сигнал без дополнительной обработки 4.8 Кбит/с. Распределение OSMк



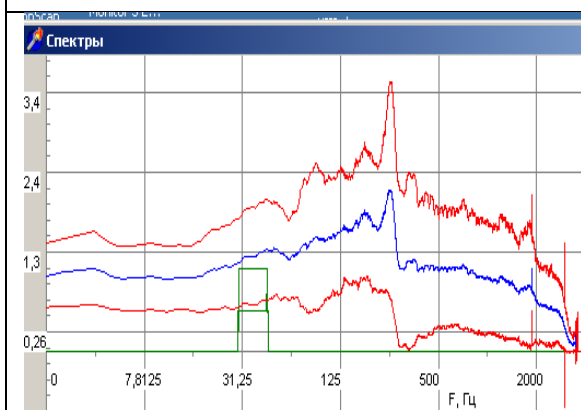
Сигнал без дополнительной обработки 4.8 Кбит/с. Распределение dOSMк



Среднестатистическая тенденция и СКО изменения МАС 16 Кбит/с



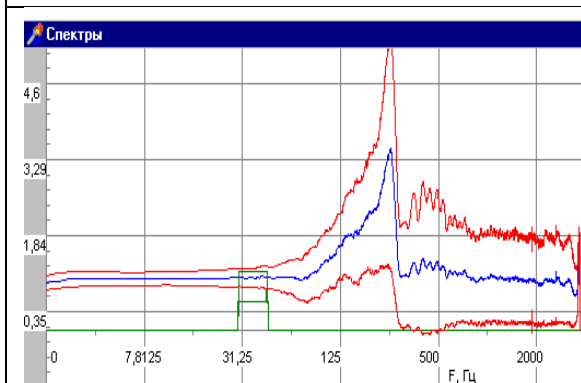
Нормализованное распределение ПФ кепстральной функции 16 Кбит/с



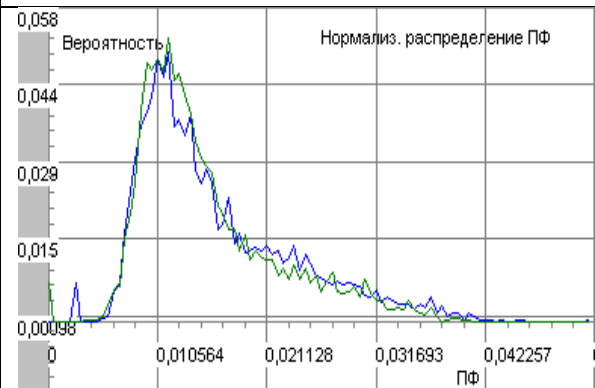
Среднестатистическая тенденция и СКО изменения МАС 8 Кбит/с



Нормализованное распределение ПФ кепстральной функции 8 Кбит/с



Среднестатистическая тенденция и СКО изменения МАС 4.8 Кбит/с

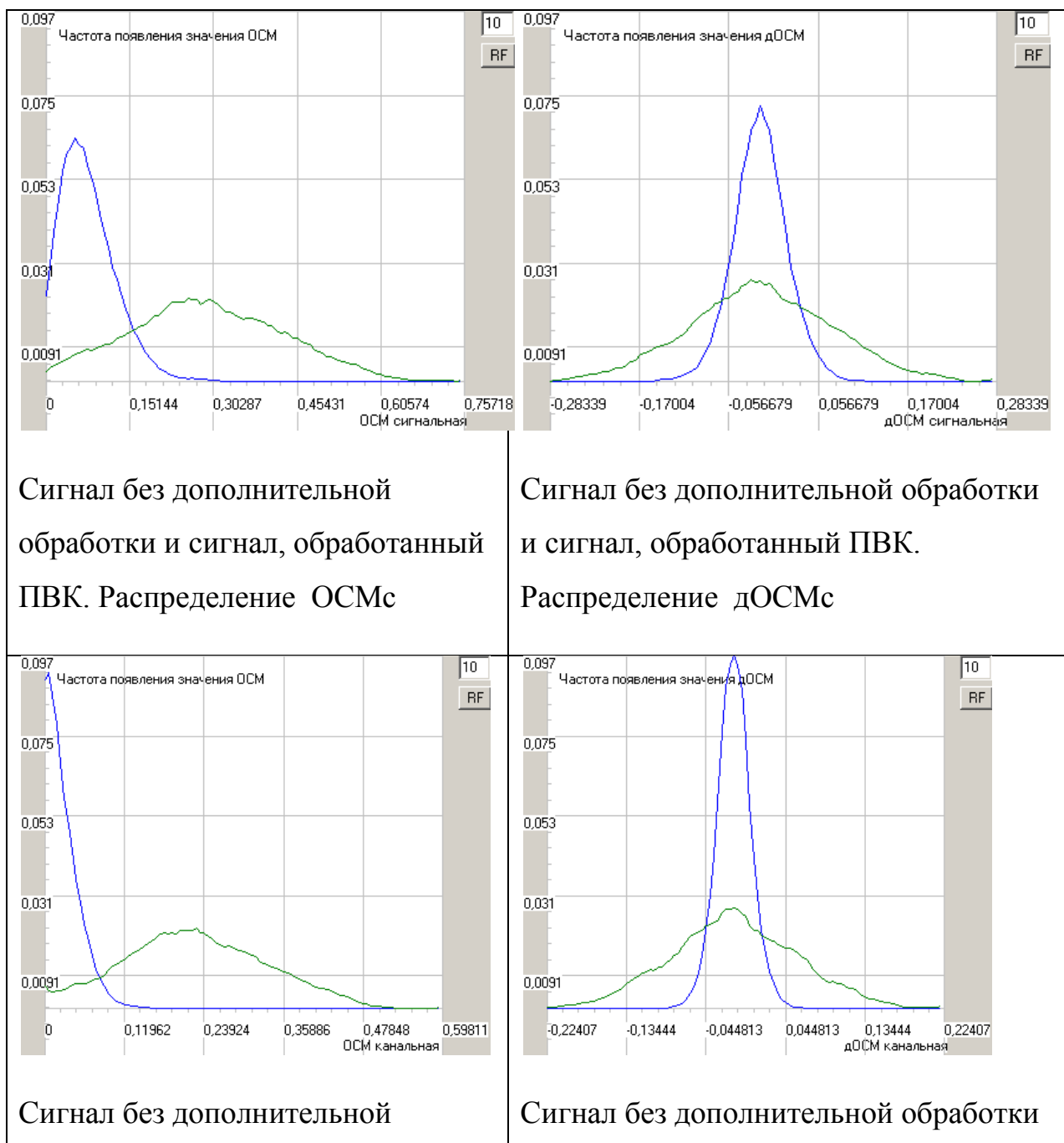


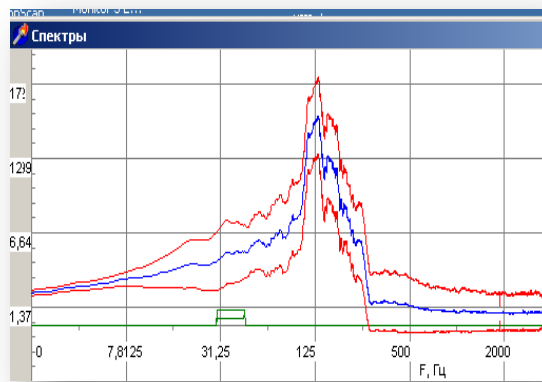

Нормализованное распределение ПФ кепстральной функции 4.8 Кбит/с

Очевидна деградация энергетических параметров и изменение спектральных параметров РС при прохождении его через кодеки, причем, естественно, кодеки с более низкими скоростями оказывают более сильное влияние на параметры РС.

## 5.2. Компенсация мскажений РС с использованием ПВК

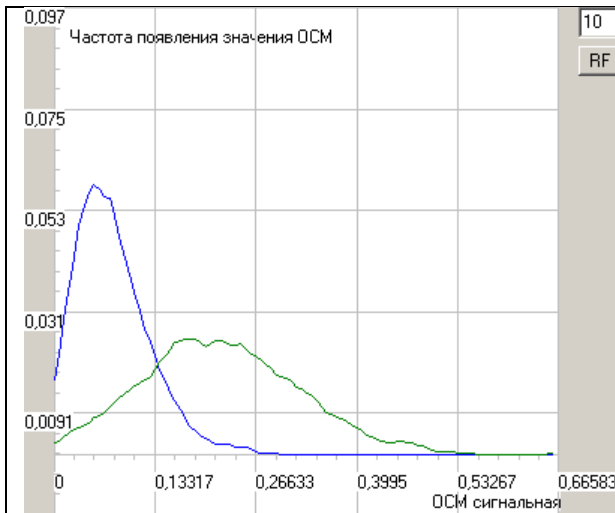
Рассмотрим теперь изменение параметров РС при обработке его алгоритмом ПВК.



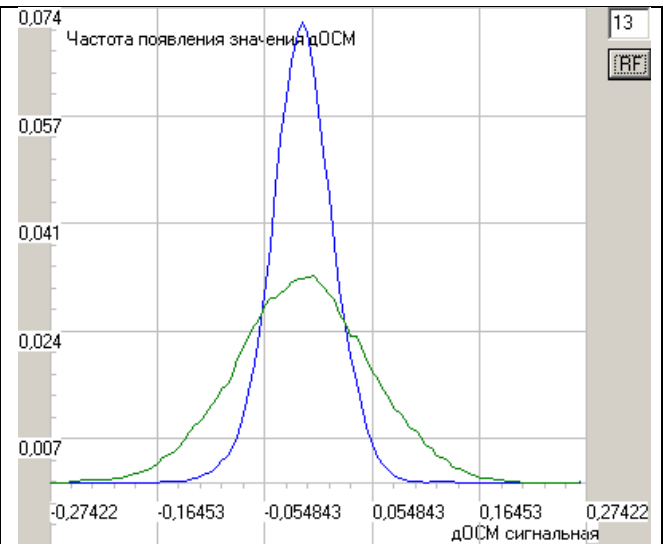
<p>обработки и сигнал, обработанный ПВК. Распределение ОСМж</p>	<p>и сигнал, обработанный ПВК. Распределение дОСМж</p>
 <p>Среднестатистическая тенденция и СКО изменения МАС</p>	 <p>Нормализованное распределение ПФ кепстральной функции</p>

Очевидно резкое улучшение энергетических параметров, подъем ОСМ, что должно в значительной степени скомпенсировать его деградацию в ходе кодирования.

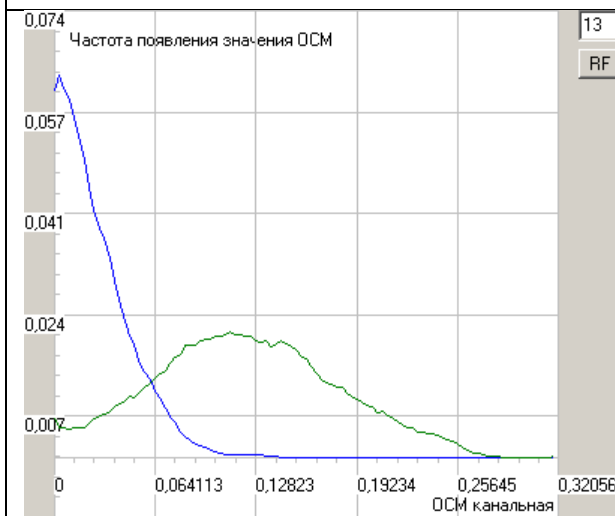
Проведем теперь сравнительное исследование изменения параметров необработанного сигнала, по сравнению с сигналом, обработанным ПВК, при прохождении через кодек.



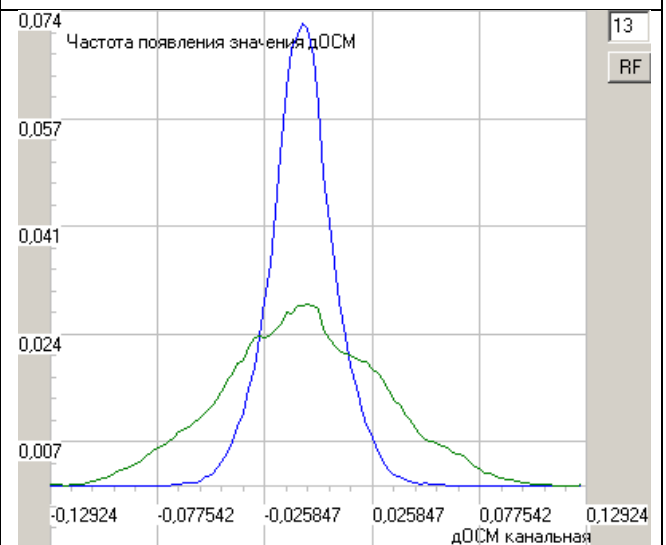
Сигнал без дополнительной обработки и сигнал, обработанный ПВК на входе кодека 16 Кбит/с. Распределение OSMc



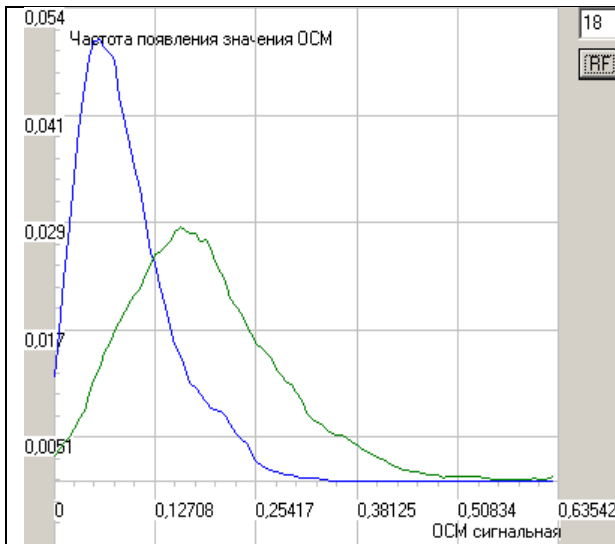
Сигнал без дополнительной обработки и сигнал, обработанный ПВК на входе кодека 16 Кбит/с. Распределение dOSMc



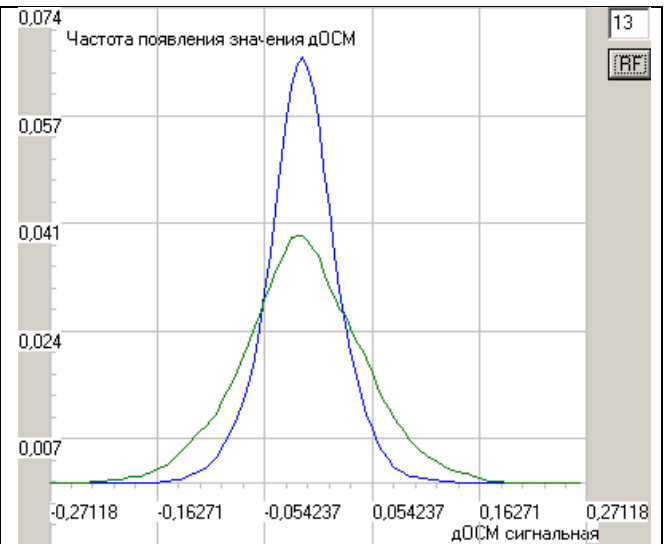
Сигнал без дополнительной обработки и сигнал, обработанный ПВК на входе кодека 16 Кбит/с. Распределение OSMк



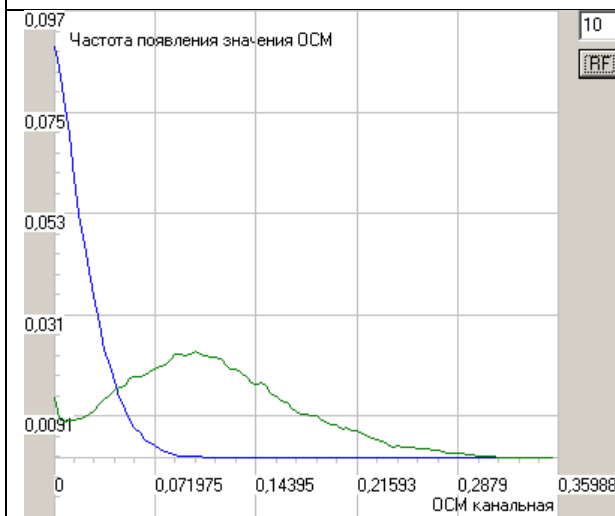
Сигнал без дополнительной обработки и сигнал, обработанный ПВК на входе кодека 16 Кбит/с. Распределение dOSMк



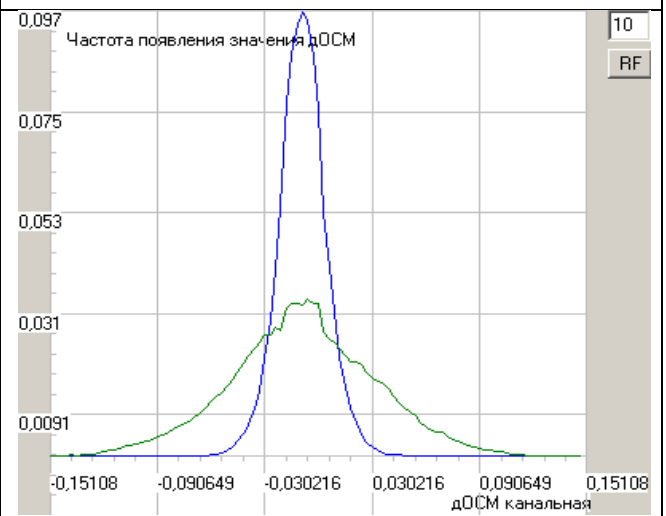
Сигнал без дополнительной обработки и сигнал, обработанный ПВК на входе кодека 8 Кбит/с. Распределение OSMc



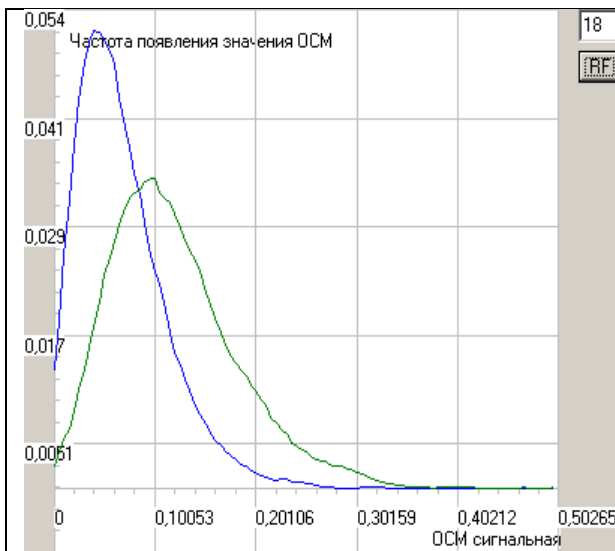
Сигнал без дополнительной обработки и сигнал, обработанный ПВК на входе кодека 8 Кбит/с. Распределение dOSMc



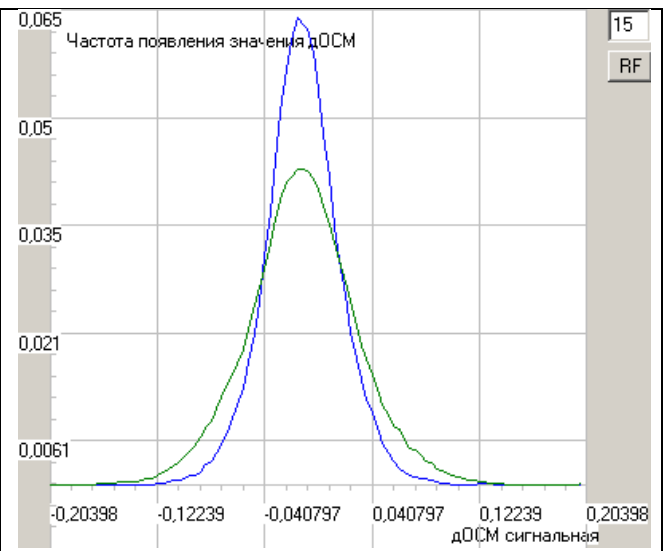
Сигнал без дополнительной обработки и сигнал, обработанный ПВК на входе кодека 8 Кбит/с. Распределение OSMk



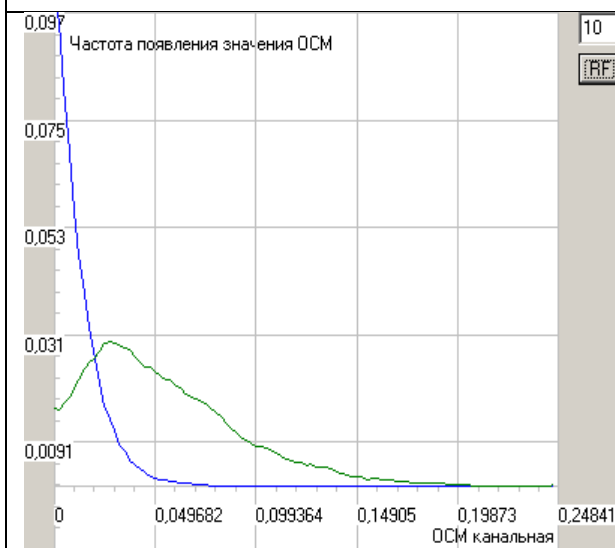
Сигнал без дополнительной обработки и сигнал, обработанный ПВК на входе кодека 8 Кбит/с. Распределение dOSMk



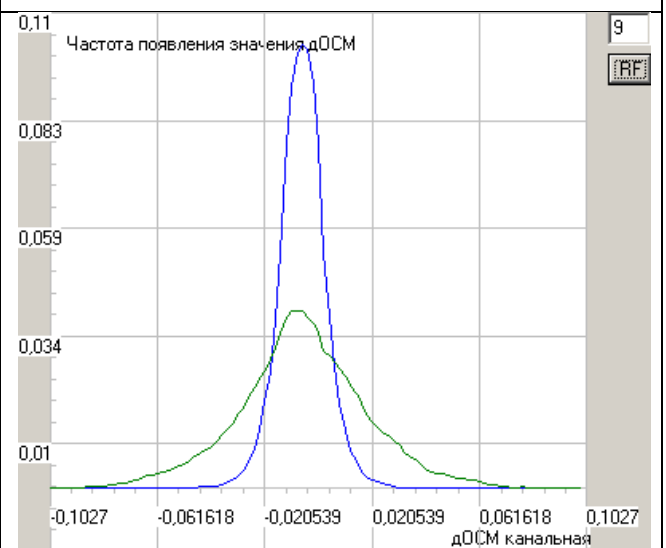
Сигнал без дополнительной обработки и сигнал, обработанный ППК на входе кодека 4.8 Кбит/с. Распределение OSMc



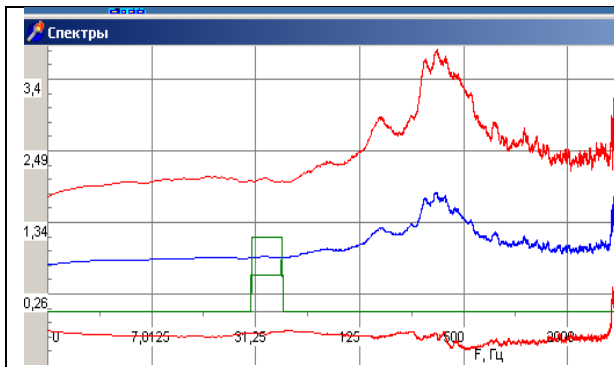
Сигнал без дополнительной обработки и сигнал, обработанный ППК на входе кодека 4.8 Кбит/с. Распределение dOSMc



Сигнал без дополнительной обработки и сигнал, обработанный ППК на входе кодека 4.8 Кбит/с. Распределение OSMк



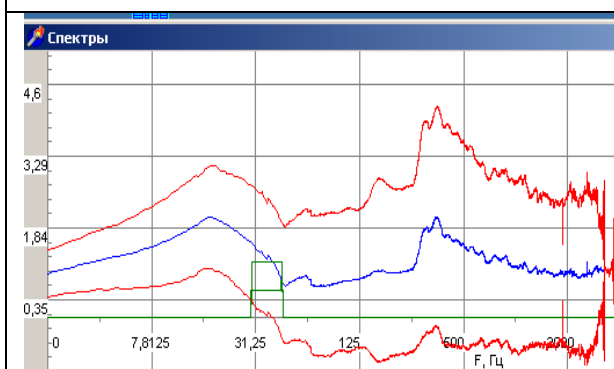
Сигнал без дополнительной обработки и сигнал, обработанный ППК на входе кодека 4.8 Кбит/с. Распределение dOSMк



Среднестатистическая тенденция и СКО изменения МАС 16 Кбит/с



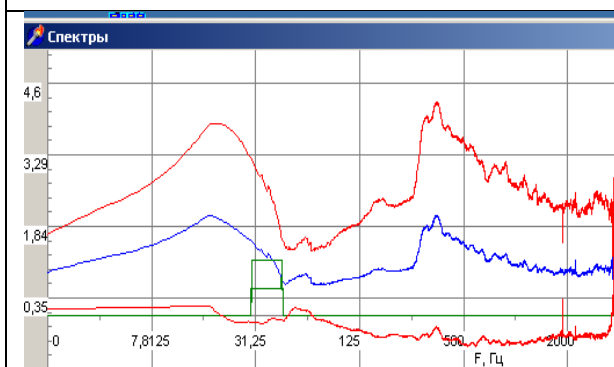
Нормализованное распределение ПФ кепстральной функции 16 Кбит/с



Среднестатистическая тенденция и СКО изменения МАС 8 Кбит/с



Нормализованное распределение ПФ кепстральной функции 8 Кбит/с



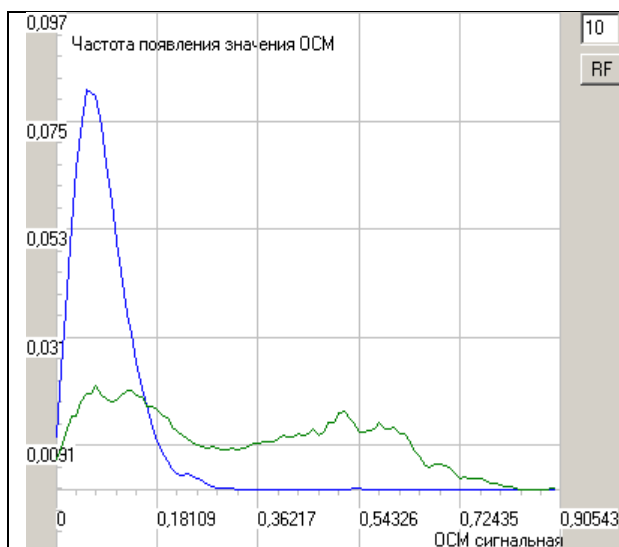
Среднестатистическая тенденция и СКО изменения МАС 4.8 Кбит/с



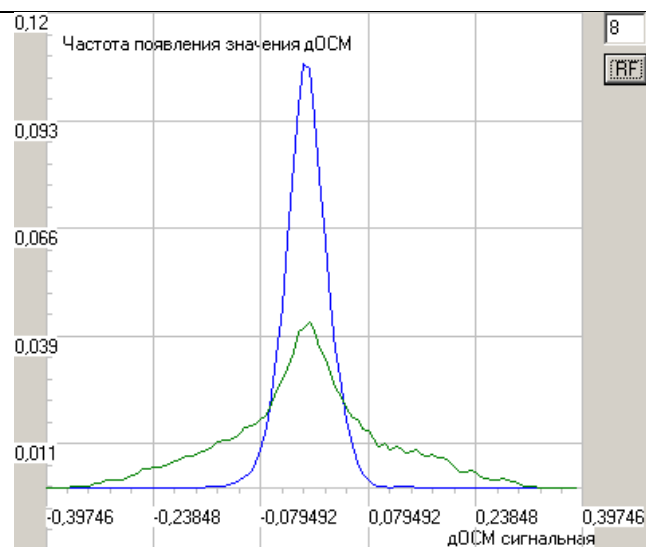
Нормализованное распределение ПФ кепстральной функции 4.8 Кбит/с



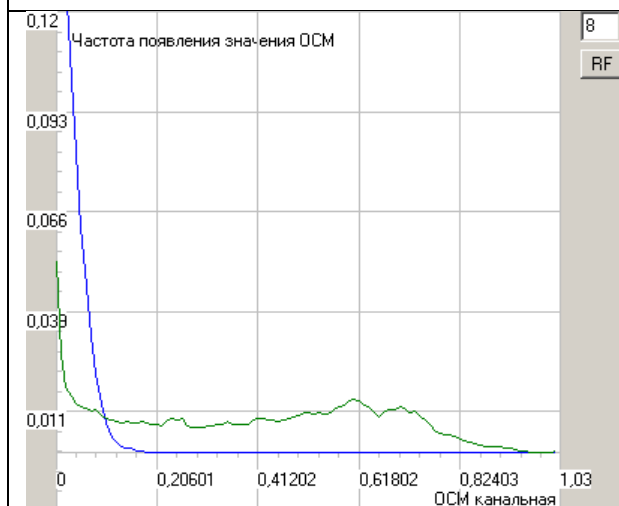
Оценим теперь восстановительные характеристики ПВК, проведя сравнительное исследование изменения параметров сигнала, прошедшего через кодек и обработанного на выходе ПВК.



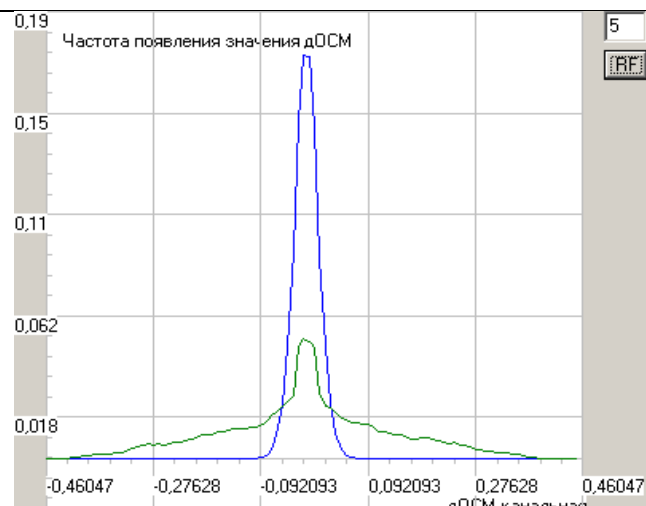
Сигнал без дополнительной обработки и сигнал, обработанный ПВК на выходе кодека 16 Кбит/с.  
Распределение ОСМс



Сигнал без дополнительной обработки и сигнал, обработанный ПВК на выходе кодека 16 Кбит/с.  
Распределение дОСМс

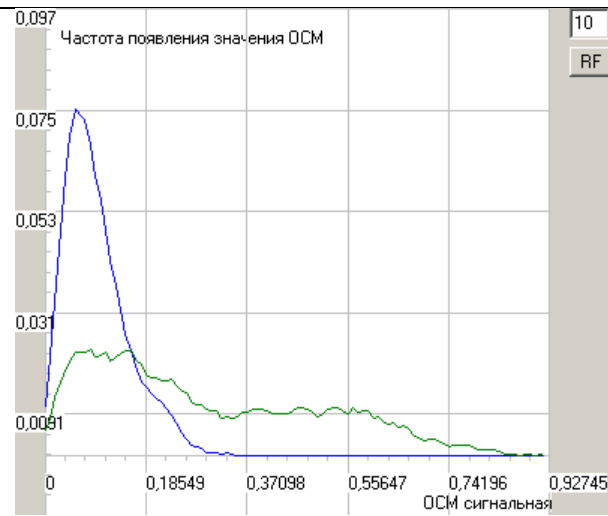


Сигнал без дополнительной обработки и сигнал, обработанный ПВК на выходе кодека 16 Кбит/с.



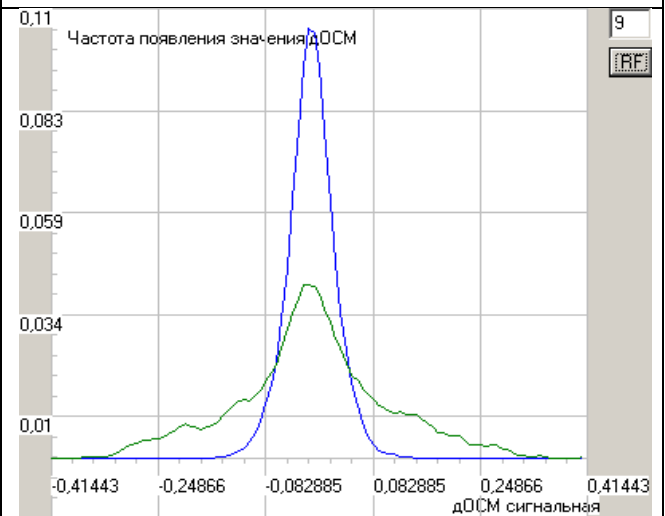
Сигнал без дополнительной обработки и сигнал, обработанный ПВК на выходе кодека 16 кбит/с.

### Распределение ОСМк

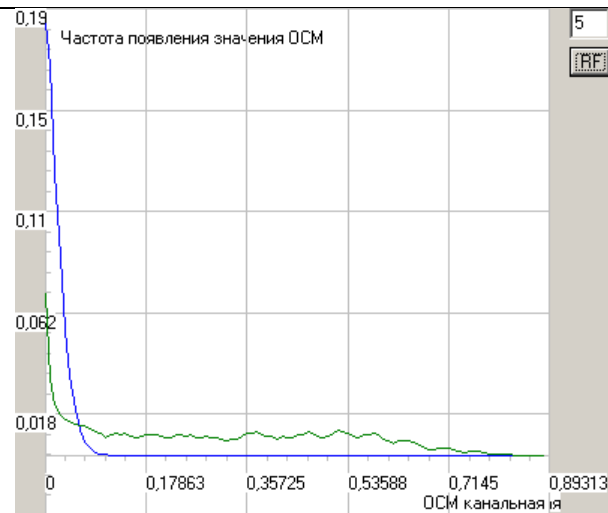


Сигнал без дополнительной обработки и сигнал, обработанный ППК на выходе кодека 8 Кбит/с.  
Распределение ОСМс

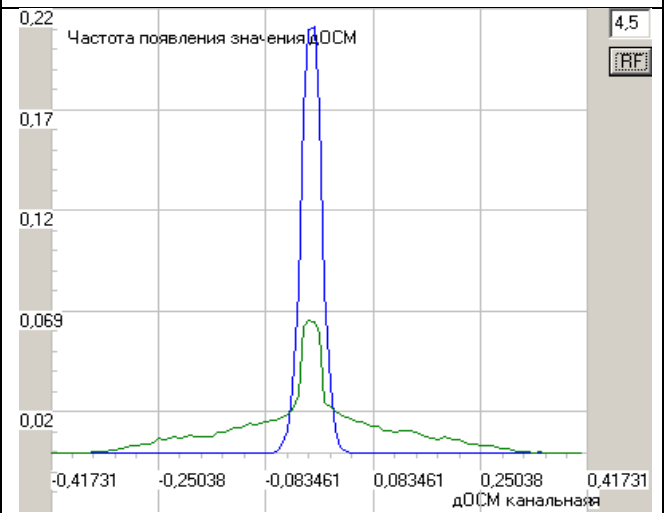
### Распределение ДОСМк



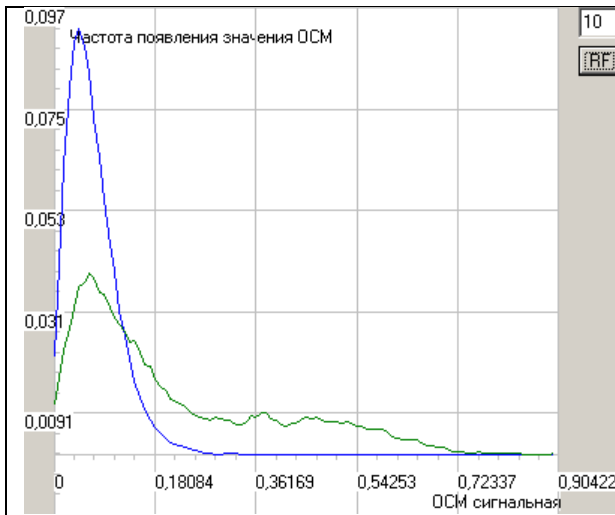
Сигнал без дополнительной обработки и сигнал, обработанный ППК на выходе кодека 8 Кбит/с. Распределение ДОСМс



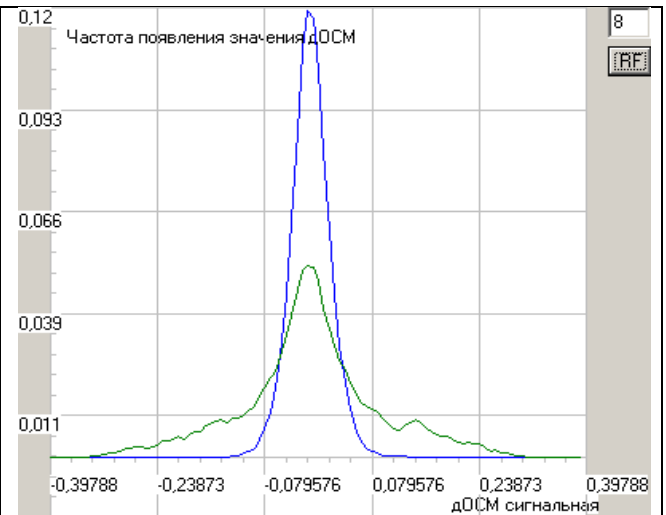
Сигнал без дополнительной обработки и сигнал, обработанный ППК на выходе кодека 8 Кбит/с.  
Распределение ОСМк



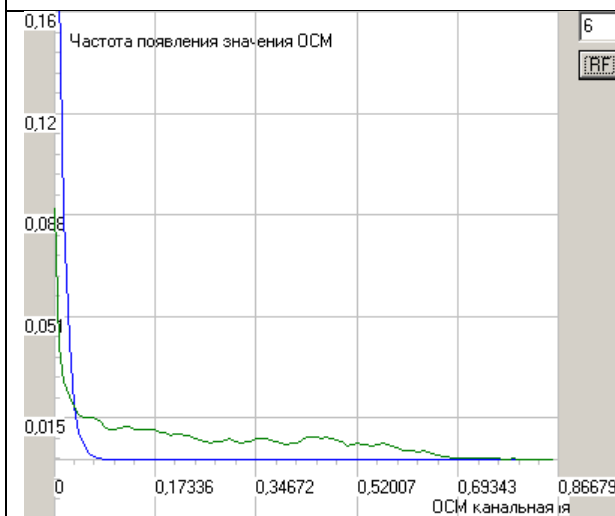
Сигнал без дополнительной обработки и сигнал, обработанный ППК на выходе кодека 8 Кбит/с. Распределение ДОСМк



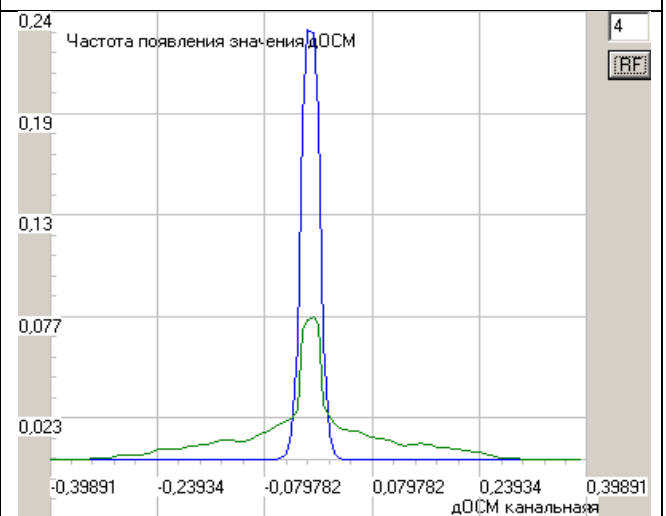
Сигнал без дополнительной обработки и сигнал, обработанный ПВК на выходе кодека 4.8 Кбит/с.  
Распределение OSMс



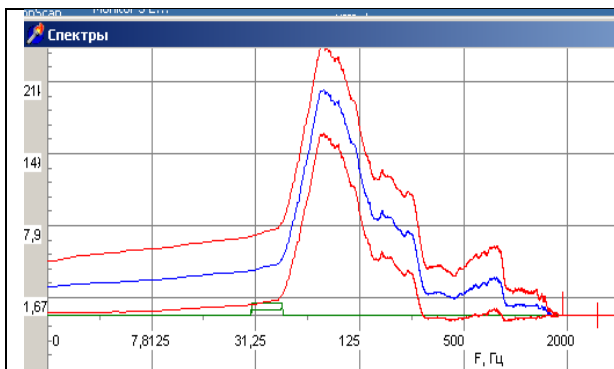
Сигнал без дополнительной обработки и сигнал, обработанный ПВК на выходе кодека 4.8 Кбит/с.  
Распределение dOSMс



Сигнал без дополнительной обработки и сигнал, обработанный ПВК на выходе кодека 4.8 Кбит/с.  
Распределение OSMк



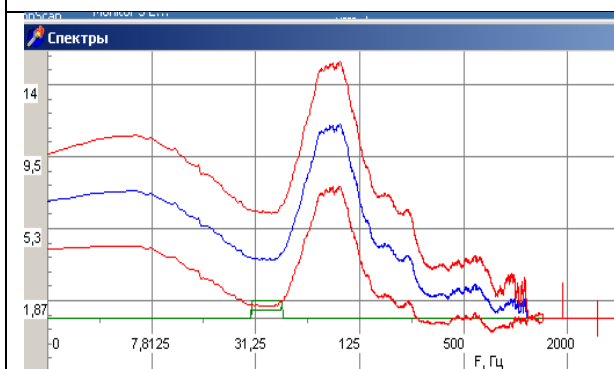
Сигнал без дополнительной обработки и сигнал, обработанный ПВК на выходе кодека 4.8 Кбит/с.  
Распределение dOSMк



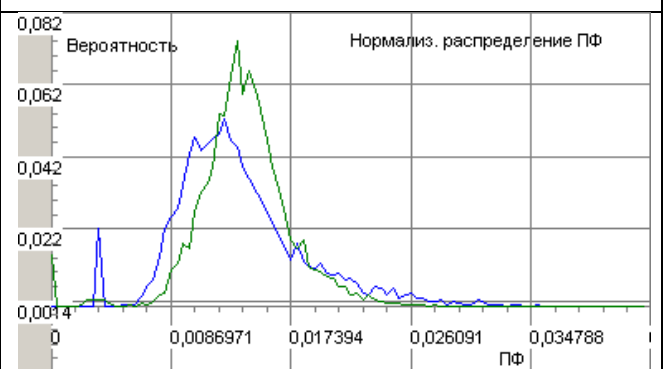
Сигнал без дополнительной обработки и сигнал, обработанный ППК на выходе кодека.  
Среднестатистическая тенденция и СКО изменения МАС 16 Кбит/с



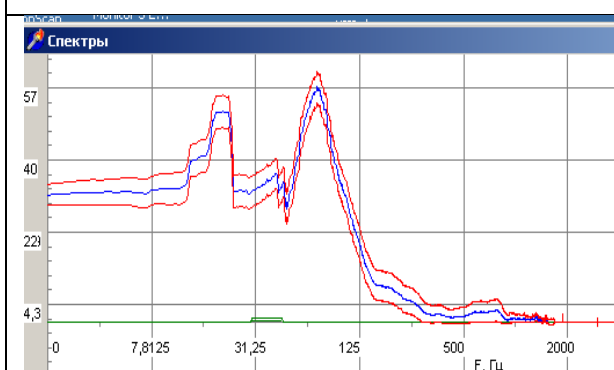
Сигнал без дополнительной обработки и сигнал, обработанный ППК на выходе кодека. Нормализованное распределение ПФ кепстральной функции 16 Кбит/с



Сигнал без дополнительной обработки и сигнал, обработанный ППК на выходе кодека.  
Среднестатистическая тенденция и СКО изменения МАС 8 Кбит/с



Сигнал без дополнительной обработки и сигнал, обработанный ППК на выходе кодека. Нормализованное распределение ПФ кепстральной функции 8 Кбит/с

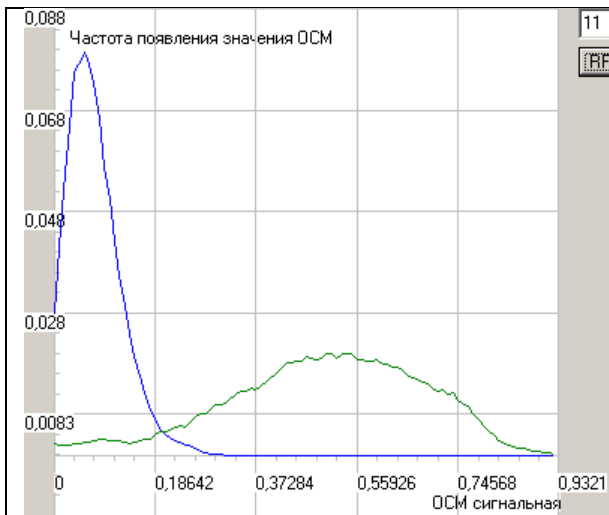


Сигнал без дополнительной обработки и сигнал, обработанный ПВК на выходе кодека.

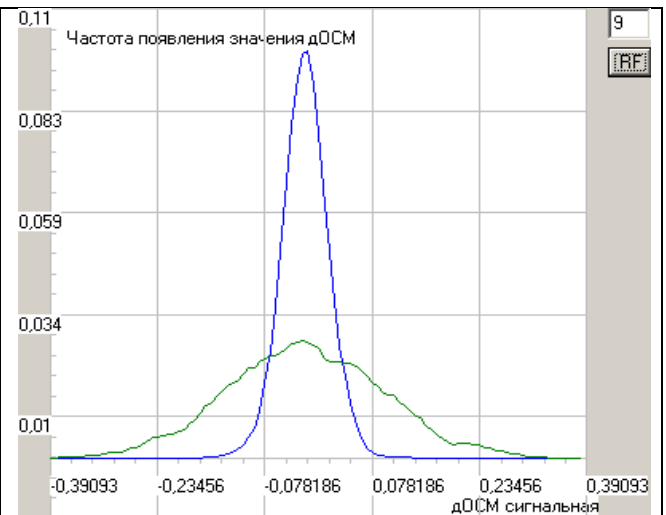
Среднестатистическая тенденция и СКО изменения МАС 4.8 Кбит/с

Сигнал без дополнительной обработки и сигнал, обработанный ПВК на выходе кодека. Нормализованное распределение ПФ кепстральной функции 4.8 Кбит/с

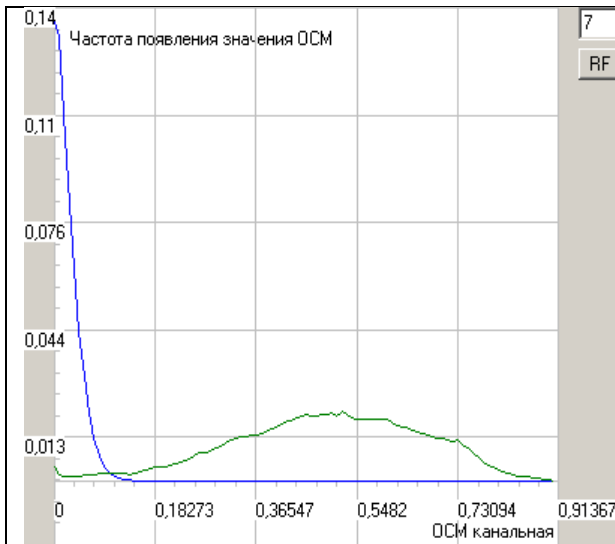
Исследуем теперь ситуацию, когда устройство обработки ПВК установлено и на входе, и на выходе канала.



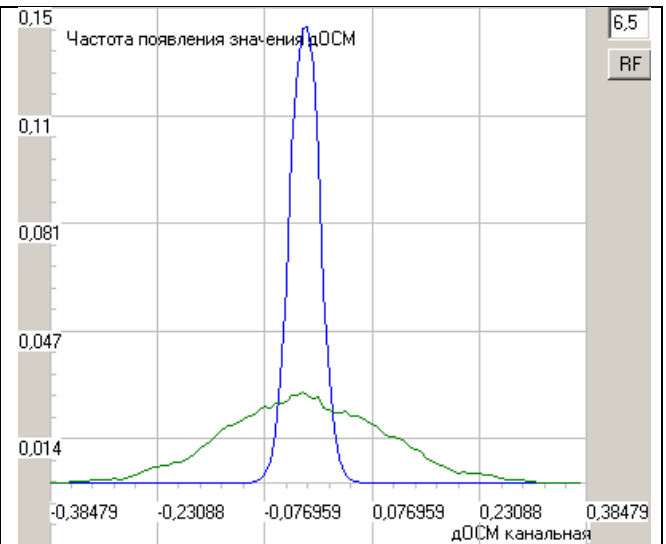
Сигнал без дополнительной обработки и сигнал, обработанный ПВК на входе и выходе кодека 16 Кбит/с. Распределение ОСМс



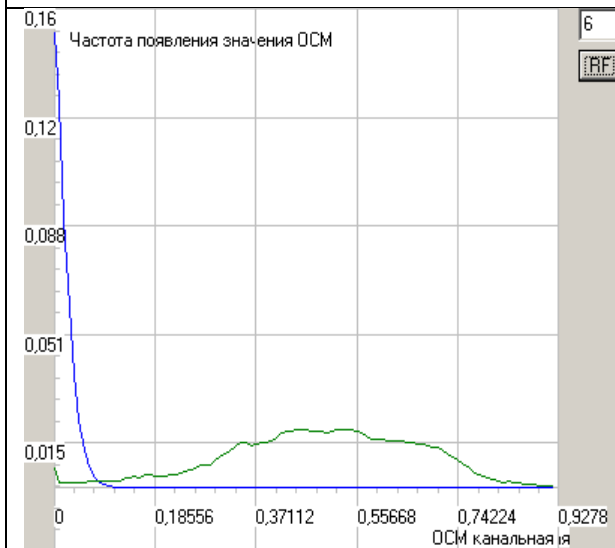
Сигнал без дополнительной обработки и сигнал, обработанный ПВК на входе и выходе кодека 16 Кбит/с. Распределение дОСМс



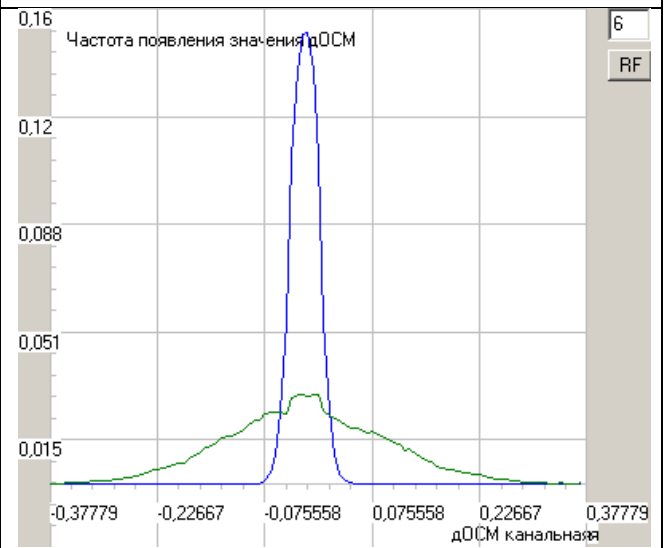
Сигнал без дополнительной обработки и сигнал, обработанный ПВК на входе и на выходе кодека 16 Кбит/с. Распределение OSMк



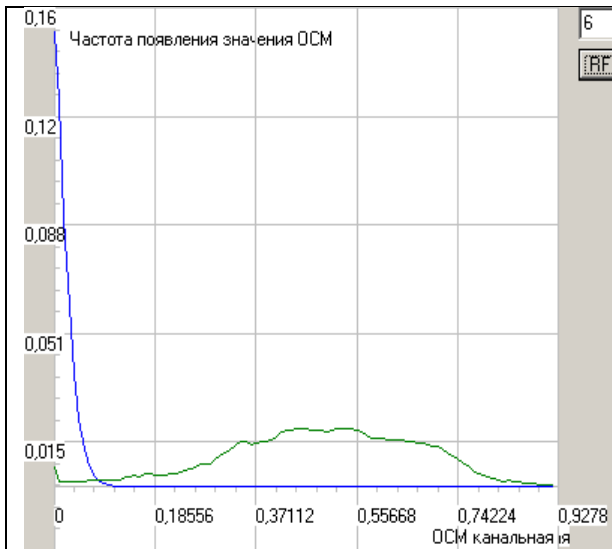
Сигнал без дополнительной обработки и сигнал, обработанный ПВК на входе и на выходе кодека 16 Кбит/с. Распределение dOSMк



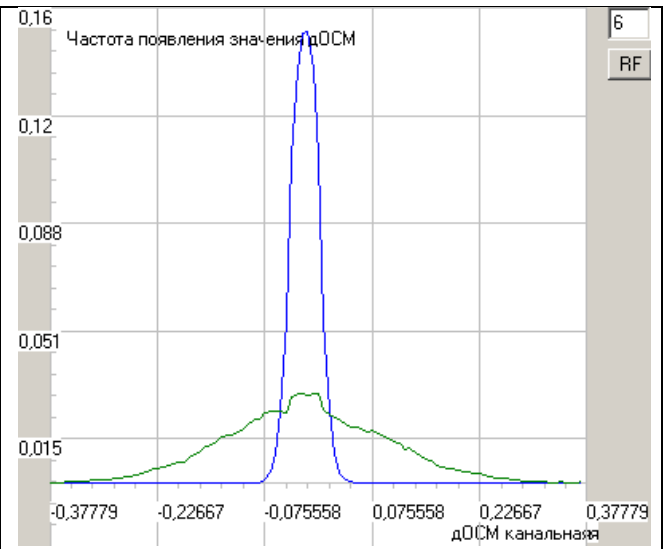
Сигнал без дополнительной обработки и сигнал, обработанный ПВК на входе и на выходе кодека 8 Кбит/с. Распределение OSMс



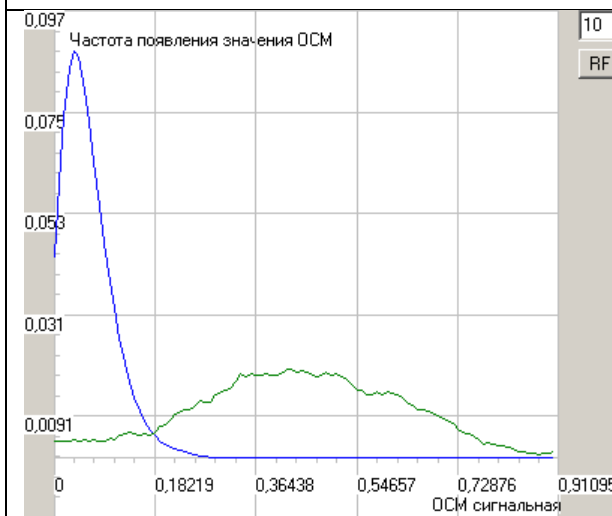
Сигнал без дополнительной обработки и сигнал, обработанный ПВК на входе и на выходе кодека 8 Кбит/с. Распределение dOSMс



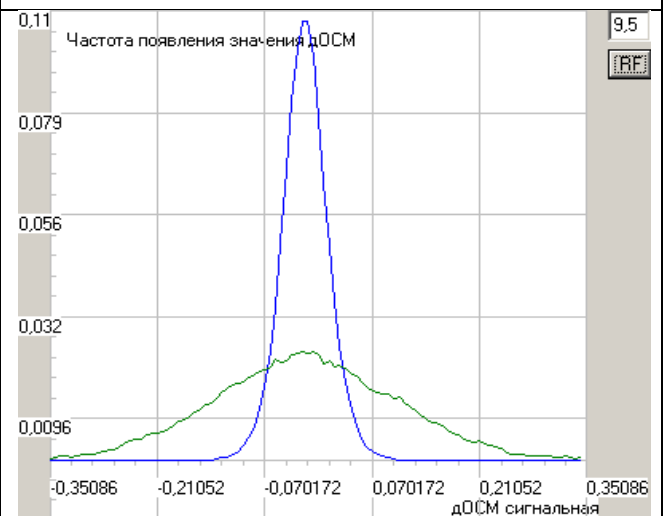
Сигнал без дополнительной обработки и сигнал, обработанный ПВК на входе и на выходе кодека 8 Кбит/с. Распределение OSMк



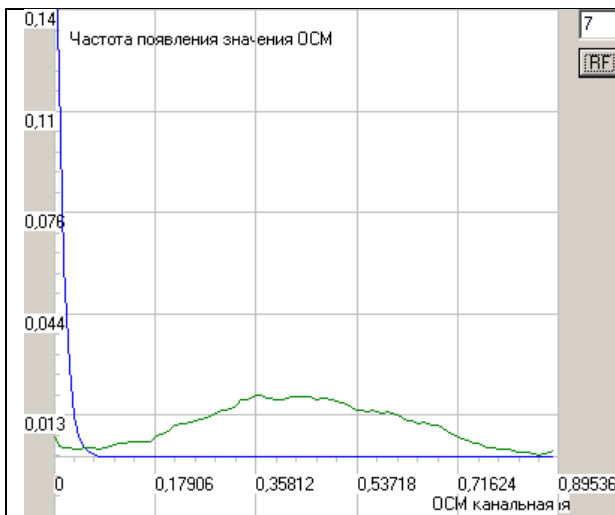
Сигнал без дополнительной обработки и сигнал, обработанный ПВК на входе и на выходе кодека 8 Кбит/с. Распределение dOSMк



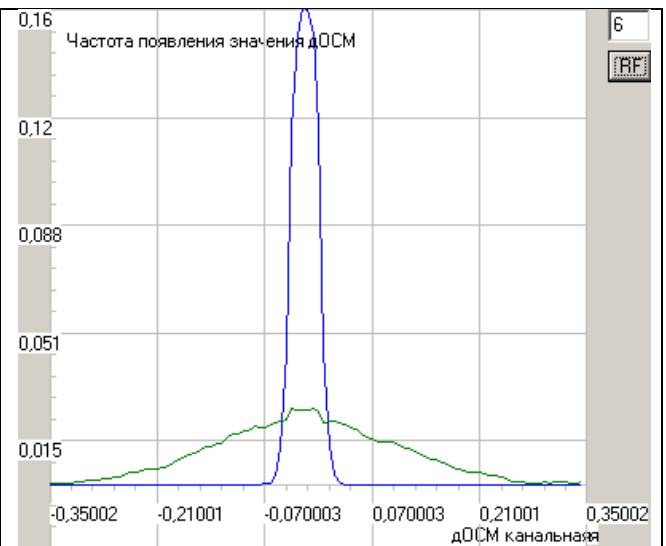
Сигнал без дополнительной обработки и сигнал, обработанный ПВК на входе и на выходе кодека 4.8 Кбит/с. Распределение OSMс



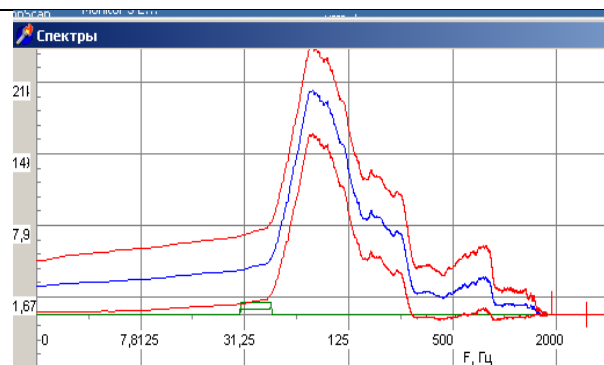
Сигнал без дополнительной обработки и сигнал, обработанный ПВК на входе и на выходе кодека 4.8 Кбит/с. Распределение dOSMс



Сигнал без дополнительной обработки и сигнал, обработанный ПВК на входе и на выходе кодека 4.8 Кбит/с. Распределение OCMк



Сигнал без дополнительной обработки и сигнал, обработанный ПВК на входе и на выходе кодека 4.8 Кбит/с. Распределение dOCMк

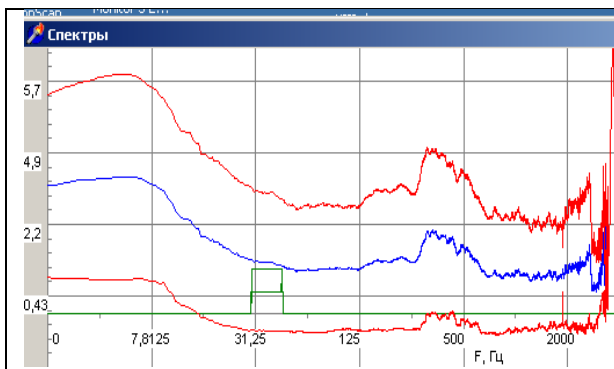


Сигнал без дополнительной обработки и сигнал, обработанный ПВК на входе и на выходе кодека. Среднестатистическая тенденция и СКО изменения МАС 16 Кбит/с

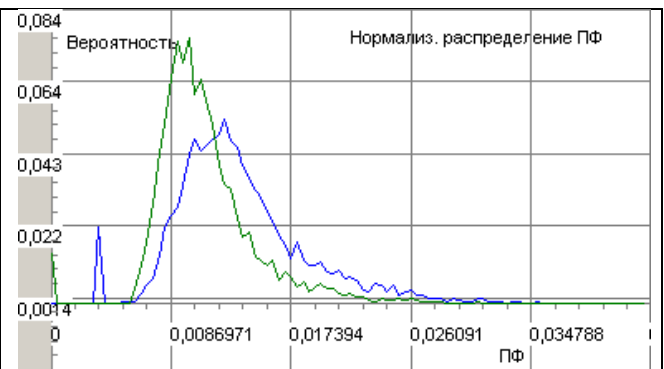


Сигнал без дополнительной обработки и сигнал, обработанный ПВК на входе и на выходе кодека. Сигнал без дополнительной обработки. Нормализованное распределение ПФ кепстральной функции 16 Кбит/с

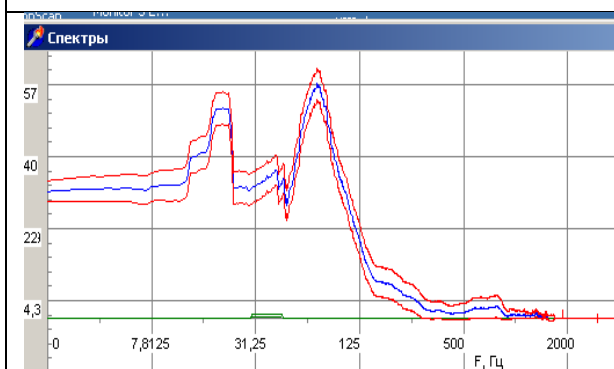




Сигнал без дополнительной обработки и сигнал, обработанный ПВК на входе и на выходе кодека. Среднестатистическая тенденция и СКО изменения МАС 8 Кбит/с



Сигнал без дополнительной обработки и сигнал, обработанный ПВК на входе и на выходе кодека. Сигнал без дополнительной обработки. Нормализованное распределение ПФ кепстральной функции 8 Кбит/с



Сигнал без дополнительной обработки и сигнал, обработанный ПВК на входе и на выходе кодека. Сигнал без дополнительной обработки. Среднестатистическая тенденция и СКО изменения МАС 4.8 Кбит/с



Сигнал без дополнительной обработки и сигнал, обработанный ПВК на входе и на выходе кодека. Сигнал без дополнительной обработки. Нормализованное распределение ПФ кепстральной функции 4.8 Кбит/с

Во всех трех случаях разного способа установки ПВК, мы наблюдаем улучшение энергетических и частотных параметров сигнала. В приложении 2 приведем численные результаты исследований, сравним их с известными данными экспертных исследований по оценке качества сжатого речевого сигнала и приведем рекомендации по обработке речевого сигнала в СПРС.

## **Выводы**

В ходе проведенного полунатурного моделирования подтверждена возможность компенсации искажений многократного кодирования с помощью разработанного алгоритма предварительной и восстановительной коррекции. Определены преимущества совместного использования обоих видов коррекции в канале.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённый анализ существующих методов оценки качества передачи РС показал, что применяемые ранее субъективные и объективные методы в настоящее время нуждаются в совершенствовании.

Разработан интегральный пятибалльный критерий оценки, в состав которого входят: громкость, разборчивость, натуральность. Разработаны математические основы имитационной модели, реализующей предлагаемую методику, отвечающую требованиям руководящих документов и международной рекомендации МСЭ-Т.

Разработаны логический алгоритм и прикладное программное обеспечение имитационной модели метода объективного контроля качества, позволяющие оценить влияние структур абонентских линий и каналов, а также разновидности видов шума на качество передачи информации РС в каналах с сохранением формы сигнала.

Анализируя результаты экспериментальных исследований на имитационной модели, целесообразно рекомендовать применять УК в процессе эксплуатации как эффективное средство автоматического контроля качества передачи РС по каналам мобильной связи в неадаптивных каналах СПРС.

Разработан метод объективной оценки качества передачи РС по изменению интегральных распределений энергетических, параметров формы аналитической огибающей, спектральных и кепстральных параметров.

Проведен анализ деградации качества передачи в многозвенных каналах, характерных для Палестины, с многократным компактным представлением РС.

Разработан алгоритм предварительной и восстановительной коррекции РС с обработкой его аналитической огибающей, позволяющий практически скомпенсировать его деградацию в многозвенном канале.

Произведена оценка эффективности разработанных методов оценки качества передачи РС и способа предварительной и восстановительной коррекции подтвердившая перспективность их использования в СПРС.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тихвинский В.О., Володина Е.Е. Подвижная связь третьего поколения. Экономика и качество услуг. – М.: Радио и связь, Горячая линия – Телеком, 2005 – 240 с.
2. Вемян Г.В. Передача речи по сетям электросвязи. – М.: Радио и связь, 1985 – 272 с.
3. Руководящий документ Министерства РФ по связи и информатизации РД 45.254-2002 «Нормы на показатели качества услуг связи и методики проведения их оценочных испытаний»
4. ITU-T Recommendation E.800 (08.1994) Terms and definitions, related to Quality of Services and network performance including dependability
5. Цыбулин М.К., Бокуняев К.А. Особенности оценки качества передачи речевой информации по каналам мобильной связи // Электросвязь, 2003. - № 10. – с. 18-20
6. Рихтер С.Г. Цифровое радиовещание. М.: Горячая линия – Телеком, 2004 – 350 с.
7. Анализ структуры речевых сигналов. <http://www.telcenter.ru/>
8. Параметры первичных сигналов. <http://www.kunegin.narod.ru/>
9. Гордиенко В.Н., Тверецкий М.С. Многоканальные телекоммуникационные системы. М.: Горячая линия – Телеком, 2005 – 414 с.
10. Бабков В.Ю., Полынцев П.В., Устюжанин В.И. Качество услуг мобильной связи. Оценка, контроль и управление. – М.: Горячая линия – Телеком, 2005 – 160 с.
11. Битнер В.И., Попов Г.Н. Нормирование качества телекоммуникационных услуг. – М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 312 с.

12. CCITT Recommendation E.432. Telephone network and ISDN quality of service, network management and traffic engineering. Connection quality. Geneva, 1992
13. ITU-T Recommendation P.82. Blue book, volume V. Telephone transmission quality. Subjective opinion tests. Method for evaluation of service from the standpoint of speech transmission quality, 1993
14. Минашкин В.Г., Гусынин А.Б., Садовникова Н.А., Шмойлова Р.А. Курс лекций по теории статистики. – М.: ММИЭИФП, 2003 – 189 с.
15. ITU-T Recommendation P.800 (08/96). Methods for subjective determination of transmission quality
16. Фаерберг О.И., Шварцман В.О. Качество услуг связи. – М.: ИРИАС, 2005 – 152 с.
17. Шварцман В.О. QoS – система гарантированного качества услуг. // Век качества, 2001. - № 6
18. Мишенков С.Л., Рихтер С.Г., Прилипко В.И. Сертификация услуг звукового вещания. Учебное пособие. – М.: МТУСИ, 1997 – 63 с.
19. Федеральный закон «О связи». – 3-е изд. – М.: Ось-89, 2006 – 48 с.
20. Арцишевский В.В., Гольдштейн Б.С., Маршак М.А. Тестирование качества функционирования сети связи общего пользования
21. ITU-T Recommendation G.107. International telephone connections and circuits – General definitions. The E-model, a computational model for use in transmission planning. 03/2003
22. Цыбулин М.К., Бокуняев К.А. Численные методы оценки качества передачи речевой информации по каналам мобильной связи // Электросвязь, 2004. - № 3. – с. 20-21
23. Нгуен Фи Туен, Цыбулин М.К., Еншель Х.И. Новый объективный метод оценки разборчивости речевой информации, передаваемой по каналу связи // Электросвязь, 1999. - № 8. – с. 31-32
24. Цыбулин М.К., Бочаров М.О., Горохов Г.Л. Оценка качества передачи речевой информации // Вестник связи, 2006. - № 3. – с. 58-60

- 25.ГОСТ Р 51061-97 «Системы низкоскоростной передачи речи по цифровым каналам. Параметры качества речи и методы измерений»
- 26.Ратынский М.В. Основы сотовой связи / Под ред. Д.Б. Зимины. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 2000 – 248 с.
- 27.Цыбулин М.К., Нгуен Туен Фи. Модернизация объективных методов оценки качества передачи речевой информации по каналам связи // Тезисы докладов ЛII научной сессии, посвященной Дню Радио. - М. - 1997. - с.103-104
- 28.Руководящий документ Министерства РФ по связи и информатизации РД 45.151-2000 «Программа и методика технических испытаний системы сотовой радиотелефонной связи стандарта GSM при приемке и вводе в эксплуатацию законченного строительством объекта связи»
- 29.Нгуен Суан Зунг. Совершенствование современных методов оценки качества передачи речевой информации по каналам связи, оборудованным эхоподавителями. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. М., 2001
- 30.Нгуен Суан Зунг, Цыбулин М.К., Шевелев С.В. Интегральная оценка качества передачи речевой информации // Тезисы докладов научной конференции Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи им. А.С.Попова, - М.: Информсвязьиздат, 2001
- 31.Нгуен Суан Зунг, Цыбулин М.К., Шевелев С.В. Объективный метод оценки натуральности речи в каналах связи // Тезисы докладов научной конференции Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи им. А.С.Попова, - М.: Информсвязьиздат, 2001
- 32.Нгуен Суан Зунг, Цыбулин М.К., Шевелев С.В. Совершенствование объективного метода оценки качества передачи речевой информации по эхозащищенным каналам // Тезисы докладов научной конференции Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи им. А.С.Попова, - М.: Информсвязьиздат, 2000 – с.141

33. Нгуен Суан Зунг, Цыбулин М.К. О новой усовершенствованной методике объективной оценки качества передачи речевой информации // Тезисы докладов НТК профессорско-преподавательского, научного и инженерно-технического состава МТУСИ, - М.: Информсвязьиздат, 2001 – с.288
34. Цыбулин М.К., Нгуен Туен Фи. Новый теоретический метод оценки разборчивости // Тезисы докладов ЛП научной сессии, посвященной Дню Радио. - М., 1998. - с.103-104
35. Бокуняев К.А., Цыбулин М.К. Обоснование необходимости разработки объективного метода оценки качества передачи информации по каналам мобильной связи // Тезисы докладов научно-технической конференции профессорско-преподавательского, научного и инженерно-технического состава. - М.: МТУСИ, 2005. – с. 177-178
36. Вишневецкий В.М., Портной С.Л., Шахнович И.В. Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G. - М.: Техносфера, 2009. - 472 с.
37. Григорьев В.А., Лагутенко О.И., Распаев Ю.А. Сети и системы радиодоступа. - М.: Эко-Трендз, 2005. - 384 с.
38. Маковеева М.М., Шинаков Ю.С. Системы связи с подвижными объектами: Учеб. пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 2002.– 440 с.
39. Прокис Дж. Цифровая связь. Пер. с англ./ Под ред. Д.Д. Кловского. – М.: Радио и связь. 2000. – 800 с.
40. Скляр, Бернард. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Изд. 2-е, испр. : Пер. с англ. – М. : Издательский дом “Вильямс”, 2003. – 1104 с.
41. Основы управления использованием радиочастотным спектром. Т.3: Частотное планирование сетей телерадиовещания и подвижной связи. Автоматизация управления использованием радиочастотного спектра / Под ред. М.А.Быховского. - М.: КРАСАНД, 2012. - 368 с.
42. Феер К. Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра: Пер. с англ./ Под ред. В.И. Журавлева. – М.: Радио и связь, 2000. - 520 с.



43. Весоловский К. Системы подвижной радиосвязи, Горячая линия – Телеком, Москва, 2006. – 536 с.
44. Берлин А.Н. Цифровые сотовые системы связи. – М.: Эко -Трендз, 2007. – 296 с.
45. Величко В.В. Передача данных в сетях мобильной связи третьего поколения. – М.: Радио и связь, Горячая линия – Телеком, 2005. – 332 с.
46. Попов В.И. Основы сотовой связи стандарта GSM. – М.: Эко-Трендз, 2005. – 296 с.
47. Волков Л.Н., Немировский М.С., Шинаков Ю.С. Системы цифровой радиосвязи: базовые методы и характеристики: Учеб. пособие, - М.: Эко-Трендз, 2005.
48. Галкин В.А. Цифровая мобильная радиосвязь. – М.: Горячая линия – Телеком, 2005. – 432 с.
49. Ратынский М.В. Основы сотовой связи / Под ред. Д.Б. Зимина. 2-ое изд. перераб. и дополн.- М.: Радио и связь, 2000. - 248 с.
50. Соболев В.Н. Информационные технологии в синтетической телефонии. Монография. – М.: ИРИАС, 2007. – 360 с.
51. Рихтер С.Г. Кодирование и передача речи в цифровых системах подвижной радиосвязи. Учебное пособие для вузов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2009. - 304 с.
52. Рихтер С.Г. Устройства преобразования и обработки информации в системах подвижной радиосвязи. Электронный конспект лекций для дистанционной технологии обучения / МТУСИ. - М.: 2007. – 65 с.
53. Рихтер С.Г., Смирнов Д.С. О технологических возможностях мобильности абонента в подвижной связи и вещании // Т-Comm - Телекоммуникации и Транспорт. №9 - 2011, с.118-121.
54. Рихтер С.Г. Об оценке влияния доплеровского сдвига частоты на качество связи // Материалы VIII Международной НТК «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения» (INTERMATIC-2011, ч.3) 14-17 ноября 2011 г. - Москва, МИРЭА, с.60-63

- 55.Рихтер С.Г. Обеспечение мобильного приема на физическом уровне // Т-Comm – Телекоммуникации и Транспорт. №10 - 2012, с.93-95.
- 56.Скрынников В.Г. Эволюционное развитие технологий ИМТ // Электросвязь. – 2012. - №8, с.12 – 17.
- 57.Тихвинский В.О., Архипкин В.Я. LTE WORLD SUMMIT-2013: на пути к 5G // Электросвязь. – 2013. - №7.
- 58.Schulze H., L€uders Ch. Theory and Applications of OFDM and CDMA . Wideband Wireless Communications. - England, John Wiley & Sons Ltd, 2005.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1.

### Программы объективного анализа и обработки сигнала

#### Процедуры, выделенные в файлы, подключаемые на этапе компиляции

```
(** ввод данных типа integer из файла в массив**)  
Procedure BlockInput ( Numpoints : integer; {длина блока}  
                    no : longint; {начало блока}  
                    Name : string; {имя файла}  
                    var M : LongFramePTR; {}  
                    var l : integer); {длина считанного}  
                    { блока}  
  
var size : integer;  
  
Begin  
    Size:=SizeOf(M^[0]);  
    Assign(newfile, Name);  
    Reset(newfile,size);  
    Seek(newfile,no);  
    BlockRead(newfile, M^, Numpoints, l);  
    Close(newfile);  
End; {Procedure BlockInput}
```

```
(** вывод данных типа integer из массива в файл **)  
Procedure BlockOutput ( Numpoints : integer; {длина блока}  
                    no : longint; {начало блока}  
                    Name : string; {имя файла}  
                    var M : LongFramePTR; {}  
                    var l : integer); {длина считанного}
```

{ блока }

```
var size : integer;
```

```
Begin
```

```
  Size:=SizeOf(M^[0]);
```

```
  Assign(newfile, Name);
```

```
  Reset(newfile,size);
```

```
  Seek(newfile,no);
```

```
    BlockWrite(newfile, M^, Numpoints, 1);
```

```
  Close(newfile);
```

```
End;{ Procedure BlockOutput }
```

```
Procedure Window (    F : TNVectorPTR;
```

```
    var F1 : TNVectorPTR;
```

```
    K : TNVectorPTR;
```

```
    Numpoints : integer);
```

```
var i : integer;
```

```
Begin
```

```
  for i:=0 to numpoints-1 do F1^[i]:=F^[i]*K^[i];
```

```
End;{ Procedure Window }
```

```
Procedure Barlett (f:tnvectorptr;num:integer;var f1:tnvectorptr);
```

```
  var
```

```
  i:word;
```

```
  begin
```

```
    for i:=0 to num-1 do    (*OKHO*)
```

```
    f1^[i]:=f^[i]*(1-(2*abs(i-num/2)/num))
```

```
  end;{ Procedure Barlett }
```

```
Procedure Hann (f:tnvectorptr; num:integer; var f1:tnvectorptr);
```

```
var
  i : word;
  g : single;
begin
  for i:=0 to num-1 do    (*OKHO*)
    begin
      g :=cos(2*pi*(i-(num)/2)/num/2);
      g:=g*g;
      f1^[i]:=f^[i]*g;
    end;
  end;{ Procedure Hann }
```

```
Procedure Nattoll1(f:TNVectorPTR;num:integer;var f1:TNVectorPTR);
```

```
type aa = array[0..3] of real;
const a: aa = (0.3635819,0.4891775,0.1365995,0.0106411);
      { (0.35875, 0.48829, 0.14128, 0.01168);}
var c   : real;
  i,n   : integer;
  ss    : real;
begin
  {FillChar(c,sizeof(c),0); }
  for n := 0 to num-1 do
    begin
      ss := (n - (num)/ 2)/(num);
      c:=0;
      for i := 0 to 3 do c:= c + a[i] * cos(2 * pi * i * ss);
```

```

    f1^[n]:=f^[n] * c;
end;
end;{ Procedure Nattoll1 }

```

```

Procedure Koefficient_nattoll (numpoints: integer;
                               var Kn: TNVectorPtr);
{50% перекрытие}
var
    i, ni :integer;
    f1   : TNVectorPTR;
Begin
    new(f1);
    ni:=numpoints div 2;
    for i:=0 to numpoints-1 do f1^[i]:=1;
    Nattoll1(f1,numpoints,f1);

    for i:=0 to ni-1 do Kn^[i]:=F1^[i]+F1^[i+ni];

    for i:=0 to ni-1 do Kn^[i]:=1/Kn^[i];
    dispose(f1);
End;{ Procedure Koefficient_nattoll }

```

{графика}

{uses graph, fftb\_1;}

```

Procedure Graphic2 (y1, y2, y0, x1, x2 : word;
                   numpoints : integer;
                   resum : string;
                   var step : single);
var i, gg, j1 : integer;
    ii : single;    {?}

```

```

        jj : single;
        dig : string;
Begin
    setfillstyle(1,0);
    settextjustify(CenterText,CenterText);
    bar(x1,y1,x2,y2);
    outtextxy(x1+ (x2-x1) div 2, y1+30, resum);
    settextjustify(1,0);
    step:= (x2-x1)/numpoints;
    ii:=(numpoints/25);
    line(x1,y0 ,x2,y0);
{ i:=ii;}jj:=ii;
    j1:=0;
    while (jj<=numpoints ) do
    begin
        gg:=trunc(jj*step)+x1;
        line(gg,y0, gg,y0+4);
        if frac(j1/5)=0 then
        begin
            str(jj:8:2,dig);
            outtextxy(gg,y0+12,dig);
        end;
        inc(j1);
        jj:=jj+ii;
    end;
End;{Procedure Graphic2}

```

```

Procedure Graphic ( y1, y2, y0 : word;
                   x1, x2 : word;
                   var a : TNVectorPTR;

```

```

        numpoints : integer;
        msht : real;
        resum : string; bool1, bool2 : boolean);

var
    j,i,gg , grz : integer;
    dig :string[4];
    step : single;

```

```

Procedure GrLine ;

```

```

var j : integer;

Begin
    for j:=1 to numpoints-1 do
        begin
            grz:=trunc(a^[j]*msht);
            gg:=trunc(j*step)+x1;
            line(gg,y0,gg,(y0-grz));
        end;
    End;

```

```

Procedure GrLineTo ;

```

```

var j : integer;

Begin
    for j:=1 to numpoints-1 do
        begin
            grz:=trunc(a^[j]*msht);
            gg:=trunc(j*step)+x1;
            lineto(gg,y0-grz);
        end;
    End;

```



```

begin
  if bool1 = true then Graphic2(y1, y2, y0, x1, x2, numpoints, resum, step );
  step:=(x2-x1)/numpoints;
  grz:=trunc(a^[0]*msht);
  moveto(x1,y0-grz);
  if bool2=true then GrLineTo else GrLine;
end;{ Procedure Graphic }

```

{uses fftb} поворот фаз спектральных компонентов

```

Procedure Turn_90 ( var XReal, XImag : TNVectorPTR;
                  var SinTable, CosTable : TNVectorPTR;
                  Numpoints : integer;
                  NumberOfBits : byte);

VAR
  i   : word;
  T   : single;
  ni  : integer;
BEGIN
  ni:=numpoints div 2;
      {БПФ начального массива}
  FFT (NumberOfBits, Numpoints, FALSE, XReal, XImag, SinTable, CosTable);

      { поворот на -90 град. }
  for i:=0 to ni do
  begin
    T:=XReal^[i];
    XReal^[i]:=XImag^[i];
    XImag^[i]:=-T;
  end;
  for i:=ni+1 to numpoints-1 do begin

```

```

T:=XReal^[i];
XReal^[i]:=-XImag^[i];
XImag^[i]:=T;
end;

      { ОБПФ начального массива }
FFT (NumberOfBits, Numpoints, True, XReal, XImag, SinTable, CosTable);
END;{ Procedure Turn_90  }
{-----}

```

```

Procedure Ort ( F : TNVectorPTR; {исходный сигнал}
      var Fort : TNVectorPTR; {ортогональный сигнал}
      WN : TNVectorPTR; {окно}
      var FortBuff : TNVectorPTR; {буферная переменная для орт.}
      Numpoints : integer); {длина выборки}

```

```

var

```

```

i, n, ni, s : word;

```

```

Begin

```

```

s:=SizeOf(F^);

```

```

{наложение окна}

```

```

Window( F, XReal, WN, Numpoints );

```

```

FillChar(XImag^, s,0);

```

```

{поворот на -90 гр.}

```

```

Turn_90 ( XReal, XImag, SinTable, CosTable, Numpoints,

```

```

      NumberOfBits);

```

```

ni:=Numpoints div 2;

```

```

n:=3*ni{Numpoints div 2}];

```

```

{сложение с перекрытием}

```

```
for i:=0 to ni-1 do Fort^[i]:=XReal^[i]+FortBuff^[i+ni];

    { Наложение коэффициентов, компенсирующих неравномерность окна }
for i:=0 to ni-1 do Fort^[i]:=Fort^[i]*Kn^[i];
{ сохранение в буф. перемен. }
Move(XReal^, FortBuff^, s);
End;{ Procedure Ort }
```

## Программы обработки сигнала

### Программа Chnl1.pas

```
(* жесткая характеристика *)
(* компрессирование - экспандирование *)
{50% перекрытие при синтезе ортогонального сигнала}
uses crt,graph,fftb_1{,inpdata};
{$I grinit.inc}
{$I gr_pr.inc}
{$I win.inc}
{N+}

const
  BoolCE=false{true}; (* False - сжатие; True - разжатие *)
  NameIn='d:\gala\pas\chanal\wav\ch44.wav'; {исходный файл}
  NameOut='d:\gala\pas\chanal\wav\00_.wav'; {результатирующий файл}
  Nump1=512{128}{1024}{256}; {длина выборки}
  K1=4;
  No1=800;          { начало обработки}
  {-----}
  Level0=20000;    {"закрепленная точка "}
  Maxmu=20;
  {-----}
  por=21000; m1=1000.0;
  PikDop=20000;
  PikDop1=30000;
  {-----}
Label
```

```

    lb1;
type
    LongSFrame = array[0..Kl*nump1] of single;
    LongSFramePTR = ^LongSFrame;

    LongFrame = array[0..nump1] of integer;
    LongFramePTR = ^LongFrame;

    FrameS = array[0..Kl] of single;
    FrameI = array[0..Kl] of integer;

    real=extended;
    str35=string[35];

var
    mx, msht, mu1, T, t1, mu : single;
    screenx, screeny, Dd, Dm, zy : integer;
    d,ni, shift, j1, i, numlong : integer;
    numpoints, num2, nss, Nn1 : integer;
    no, nnn, noo : longint;
    sss : string[64];
    k : single;
    ch : char;
    Amm, Amm1 : FrameS; {вх.и вых. среднев. пр.}
    Pikk, Pikk1 : FrameI;
    Mik : LongSFramePTR;
    Mik1 : LongFramePTR;

    myfile : file of integer;
    newfile : file;

```

(\* описание библиотеки \*)

NumberOfBits : byte;  
XReal : TNVectorPTR;  
XImag : TNVectorPTR;  
SinTable : TNVectorPTR;  
CosTable : TNVectorPTR;  
F, Fort : TNVectorPTR;  
F2 : TNVectorPTR;  
FScreen : TNVectorPTR;  
F1Screen : TNVectorPTR;  
F1 : TNVectorPTR;  
F3 : TNVectorPTR;  
F1buff : TNVectorPTR;  
Envelop1 : TNVectorPTR;  
Envelop2 : TNVectorPTR;  
Cos\_Phase : TNVectorPTR;  
WNtll : TNVectorPTR;  
Wndw : TNVectorPTR;  
Kn : TNVectorPTR;  
FBuf : TNVectorPTR;  
FortBuf : TNVectorPTR;  
Error : byte;

st : Integer;

(\* ----- \*)

{ \$I ort.inc }

{ \$I in\_out.inc }

FUNCTION AmplX (xr, xi : single): single;

Begin

AmplX:=sqrt(sqr(XR)+sqr(XI));

End;

FUNCTION PhaseX (xr, xi : single) : single;

var

p, d, fi : single;

Begin

d:=0; fi:=0;

if XR<>0 then fi:=ArcTan(XI/XR) else

if XI>0 then fi:=pi/2 else

if XI<0 then fi:=3\*pi/2;

if xr < 0 then d:=pi

else if xr > 0 then

if xi < 0 then d:=2\*pi;

PhaseX:=fi+d ;

End;

BEGIN

no:=No1; { начало }

numpoints:=Nump1;

shift:=numpoints{ div 2}; { сдвиг }

numlong:=nump1\*K1; { длинная выборка }

Nn1:=numlong-shift;

Num2:=Nump1\*2;

grinit;

ClearDevice;

screenx:=getmaxx;

screeny:=getmaxy;

zy:=screeny div 2; zy:=zy-32;

msht:=90/20000;

{цвет фона}

SetBkColor(15);

{цвет линий}

SetColor(1);

{-----}

F:=NEW(TNVectorPTR);

F1:=NEW(TNVectorPTR);

F2:=NEW(TNVectorPTR);

Fort:=NEW(TNVectorPTR);

FScreen:=New(TNVectorPTR);

F1Screen:=New(TNVectorPTR);

XReal:=NEW(TNVectorPTR);

XImag:=NEW(TNVectorPTR);

SinTable:=NEW(TNVectorPTR);

CosTable:=NEW(TNVectorPTR);

Envelop1:=New(TNVectorPTR);

Envelop2:=New(TNVectorPTR);

Cos\_Phase:=New(TNVectorPTR);

WNtll:=New(TNVectorPTR);

Wndw:=New(TNVectorPTR);

Kn:=New(TNVectorPTR);



```

FBuf:=New(TNVectorPTR);
FortBuf:=New(TNVectorPTR);
F3:=New(TNVectorPTR);
F1buff:=New(TNVectorPTR);
New(Mik);
New(Mik1);
{-----}
{заполнение нулями}
FillChar(FortBuf^, SizeOf(FortBuf^),0);
FillChar(FBuf^, SizeOf(FBuf^),0);
FillChar(F1Buf^, SizeOf(FBuf^),0);
FillChar(F2^, SizeOf(FBuf^),0);
FillChar(F3^, SizeOf(FBuf^),0);
FillChar(FScreen^, SizeOf(FBuf^),0);
FillChar(F1Screen^, SizeOf(FBuf^),0);
FillChar(Envelop1^, SizeOf(FBuf^),0);

FillChar(Mik^, SizeOf(Mik^),0);

FillChar(Amm, SizeOf(Amm),0);
FillChar(Pikk, SizeOf(Pikk),0);
FillChar(Amm1, SizeOf(Amm),0);
FillChar(Pikk1, SizeOf(Pikk),0);

Assign(newfile, NameOut);
ReWrite(newfile,1);
BlockWrite(newfile, FBuf^,no1*2, nss);
Close(newfile);

{ копирование заголовка }

```

```
Assign(newfile, NameIn);
Reset(newfile,1);
BlockRead(newfile,sss,SizeOf(sss), nss);
Close(newfile);
```

```
Assign(newfile, NameOut);
Reset(newfile,1);
BlockWrite(newfile, sss,nss, nss);
Close(newfile);
```

```
{-----}
```

```
{ Таблицы и константа }
```

```
TestInput(Num2,Numberofbits,Error);
  if Error<>0 then
    begin
      Writeln('ОШИБКА!! Количество отсчетов должно быть');
      Writeln('    два в степени N !!!');
      Writeln(' преобразование проигнорировано...');
      halt(1);
    end;
```

```
MakeSinCosTable_fi(Num2,1,Sintable,Costable);
```

```
Koefficient_nattoll (num2, Kn);
```

```
for i:=0 to num2-1 do WNttll^[i]:=1;
```

```
Nattoll1(WNttll, num2, WNttll);
```

```
{Коэффициенты окна для восстановления сигнала суммированием с  
перекрытием}
```

```

    for i:=0 to num2 do Wndw^[i]:=1;
    Hann (Wndw, num2, Wndw);
    {-----}

j1:=0; {счетчик выборок}
{-----}
REPEAT
    {остановка по нажатию esc}
    while keypressed do ch:=readkey;
    if ch=#27 then break;

    {ВВОД СИГНАЛА}
    BlockInput ( shift, no, NameIn, Mik1, nss);
    if nss < Nump1 then Goto Lb1; {ВЫХОД}
    {-----}
    {почти мгновенный регулятор уровня с 50% перекрытиями}

    {записываем в "хвост"}
    for i:=0 to shift-1 do F2^[Shift+i]:=Mik1^[i];

{поиск максимума}
    mx:=0;
    for i:=0 to num2-1 do
        if abs(F2^[i])>mx then mx:=abs(F2^[i]);

if mx > PikDop then
Begin
    k:=PikDop/mx;
    for i:=0 to num2-1 do F2^[i]:=F2^[i]*k;
End;

```

```

{наложение окна}
Window(F2, F2, Wndw, num2);

for i:=0 to Shift-1 do F2^[i]:=F2^[i]+FBufF^[i+shift];
Move(F2^, FBufF^, SizeOf(F^));
{-----}

{сдвигаем значения сигнала}
for i:=shift to Numlong-1 do Mik^[i-shift]:=Mik^[i];

{записываем в "хвост"}
for i:=0 to shift-1 do Mik^[Nn1+i]:=F2^[i];

{-----}
{-----}
For i:=0 to Shift-1 do F2^[i]:=Mik1^[i];

Move(Mik^, F^, Num2*4); {исходный сигнал}

{ортогональный сигнал}
Ort ( F, Fort, WNttll, FortBuff, Num2);

{-----}
{ Вычисление огибающей }
for i:=0 to numpoints-1 do Envelop1^[i]:=AmplX(F^[i], Fort^[i]);

{-----}
{Вычисление мгновенной фазы}

```

```

for i:=0 to numpoints-1 do
  if Envelop1^[i]<>0 then Cos_Phase^[i]:= F^[i]/Envelop1^[i]
    else Cos_Phase^[i]:= cos(PhaseX(F^[i], Fort^[i]));

{-----}
if BoolCE then
  { экспандирование по мю-закону огибающей}
  for i:=0 to numpoints-1 do
    Envelop2^[i]:=Level0/Maxmu*(exp(ln(1+Maxmu)*Envelop1^[i]/level0)-1)

  else
    { компрессия по мю-закону огибающей НЧ}
    for i:=0 to numpoints-1 do
      Envelop2^[i]:=Level0*ln(1+Maxmu*Envelop1^[i]/Level0)/ln(1+Maxmu);

{-----}
{ восстановление сигнала (F1^) }
for i:=0 to numpoints-1 do F1^[i]:=Envelop2^[i]*Cos_Phase^[i];
{-----}
  {ВЫХОД}
  {почти мгновенный регулятор уровня с 50% перекрытиями}

  {записываем в "хвост"}
  for i:=0 to shift-1 do F3^[Shift+i]:=F1^[i];

{ поиск максимума }
  mx:=0;
  for i:=0 to num2-1 do
    if abs(F3^[i])>mx then mx:=abs(F3^[i]);

```

```

if mx > PikDop1 then
  Begin
    k:=PikDop1/mx;
    for i:=0 to num2-1 do F3^[i]:=F3^[i]*k;
  End;

  {наложение окна}
  Window(F3, F3, Wndw, num2);

  for i:=0 to Shift-1 do F3^[i]:=F3^[i]+F1Buff^[i+shift];
  Move(F3^, F1Buff^, SizeOf(F^));
  {-----}
  {ВЫВОД в файл будет здесь}
  for i:=0 to shift-1 do Mik1^[i]:=Round(F3^[i]);
  BlockOutput ( shift, no, NameOut, Mik1, nss);

  Move(F1^, F3^, SizeOf(F^));
  {-----}
  (* КАРТИНКИ*)
  for i:=shift to numpoints-1 do FScreen^[i]:=F^[i-shift];
  for i:=shift to numpoints-1 do F1Screen^[i]:=F1^[i-shift];

  GRAPHIC(0,screeny div 2, zy div 2, 10, screenx-10,
    FScreen,numpoints,msht,'входной сигнал', true, true);

  GRAPHIC(screeny div 2, screeny-10, (screeny div 4-5)*3,10, screenx-10,
    F1Screen, numpoints,msht,'выходной сигнал', true, true);

  Move(F^,FScreen^,Numpoints*4);
  Move(F1^,F1Screen^,Numpoints*4);

```

```

{-----}
  inc(no, Shift);
{-----}
(*-----*)
  str(j1:6,sss);
  outtextxy(600,20,sss);

  inc(j1);
UNTIL num2 < 0;
  (* конец обработки N временных выборок *)
lb1:   closegraph;
Dispose(F);
Dispose(F1);
Dispose(F2);
Dispose(F3);
Dispose(Fort);

Dispose(FScreen);
Dispose(F1Screen);

Dispose(XReal);
Dispose(XImag);
Dispose(SinTable);
Dispose(CosTable);

Dispose(Envelop1);
Dispose(Envelop2);
Dispose(Cos_Phase);

Dispose(WNttl);

```

```
Dispose(Wndw);  
Dispose(Kn);  
  
Dispose(FBuff);  
Dispose(F1Buff);  
Dispose(FortBuff);  
Dispose(Mik);  
Dispose(Mik1);  
end.{Program Chn11.pas}
```



## Программа Chnl2.pas

```
(* жесткая характеристика *)
(* компрессирование - экспандирование *)
(* симметричное суммирование *)
(* фильтрация НЧ до и после *)
{50% перекрытие при синтезе ортогонального сигнала}
uses crt,graph,fftb_1{,inpdata};
{$I grinit.inc}
{$I gr_pr.inc}
{$I win.inc}
{N+}

const
  BoolCE={false}true; (* False - сжатие; True - разжатие *)
  NameIn='d:\gala\pas\chanal\wav\00.wav'; {исходный файл}
  NameOut='d:\gala\pas\chanal\wav\00_.wav'; {результатирующий файл}
  Boole=false;
  Nump1=512{128}{1024}{256}; {длина выборки}
  Kl=4; {длина выборки анализа}
  No1=140; {начало обработки}
  Q=20; {кол-во точек для нч-фильтрации}
  Q2=Q div 2; {}
  {-----}
  Level0=10000; {"закрепленная точка "}
  Maxmu=15; {}
  {-----}
  por=21000; m1=1000.0;
  PikDop={por+m1}30000;
  PikDop1=30000;
```

{-----}

Label

lb1;

type

LongFrame = array[0..Kl\*nump1] of integer;

LongFramePTR = ^LongFrame;

ShortFrame = array[0..nump1] of integer;

ShortFramePTR = ^ShortFrame;

FrameS = array[0..Kl] of single;

FrameI = array[0..Kl] of integer;

real=extended;

str35=string[50];

var

mx, msht, mu1, T, t1, mu : single;

screenx, screeny, Dd, Dm, zy : integer;

d,ni, shift, j1, i, numlong : integer;

numpoints, num2, nss, Nn1 : integer;

no, nnn, noo : longint;

sss : string[64];

k, Khf : single;

ch : char;

Mik : LongFramePTR;

myfile : file of integer;

newfile : file;

(\* описание библиотеки \*)

NumberOfBits : byte;

```

XReal      : TNVectorPTR;
XImag      : TNVectorPTR;
SinTable   : TNVectorPTR;
CosTable   : TNVectorPTR;
F, Fort    : TNVectorPTR;
FScreen    : TNVectorPTR;
F1Screen   : TNVectorPTR;
F1         : TNVectorPTR;
Envelop1   : TNVectorPTR;
Envelop2   : TNVectorPTR;
Diff1      : TNVectorPTR;
MSumm      : TNVectorPTR;
MSummH     : TNVectorPTR;
MSummHH    : TNVectorPTR;
Cos_Phase  : TNVectorPTR;
WNttl      : TNVectorPTR;
Kn         : TNVectorPTR;
FBuf       : TNVectorPTR;
FortBuf    : TNVectorPTR;
Error      : byte;
st : Integer;
(* ----- *)
{$I in_out.inc}
{$I ort.inc}

```

```

FUNCTION AmplX (xr, xi : single): single;
Begin
  AmplX:=sqrt(sqr(XR)+sqr(XI));
End;
FUNCTION PhaseX (xr, xi : single) : single;

```

```

var
  p, d, fi : single;
Begin
  d:=0; fi:=0;
  if XR<>0 then fi:=ArcTan(XI/XR) else
    if XI>0 then fi:=pi/2 else
      if XI<0 then fi:=3*pi/2;
  if xr < 0 then d:=pi
    else if xr > 0 then
      if xi < 0 then d:=2*pi;
  PhaseX:=fi+d ;

End;

```

(\*-----\*)

{НЧ-фильтрация суммированием}

```

Procedure MSummL ( F : TNVectorPTR;
  var F1 : TNVectorPTR;
  Q : byte;
  numpoints : integer);

```

```

var i, j, n : integer;
  sum : single;

```

```

Begin
  for i:=0 to numpoints-1 do
  begin
    n:=i+Q;
    sum:=0;

```

```

    for j:=i to n do sum:=sum+F^[j];
    F1^[i]:=sum/(Q+1);

    end;
End;{ Procedure MSummL }
(*-----*)

BEGIN

    no:=No1;          { начало }
    numpoints:=Nump1;
    shift:=numpoints{ div 2}; { сдвиг }
numlong:=nump1*Kl;   { длинная выборка }
    Nn1:=numlong-shift;
    Num2:=Nump1*2;

    grinit;
    ClearDevice;
    screenx:=getmaxx;
    screeny:=getmaxy;
    zy:=screeny div 2; zy:=zy-32;
    msht:=90/35000;

    { цвет фона }
    SetBkColor(15);
    { цвет линий }
    SetColor(1);
{-----}

```

```

F:=NEW(TNVectorPTR);
F1:=NEW(TNVectorPTR);
Fort:=NEW(TNVectorPTR);

FScreen:=New(TNVectorPTR);
F1Screen:=New(TNVectorPTR);

XReal:=NEW(TNVectorPTR);
XImag:=NEW(TNVectorPTR);
SinTable:=NEW(TNVectorPTR);
CosTable:=NEW(TNVectorPTR);

Envelop1:=New(TNVectorPTR);
Envelop2:=New(TNVectorPTR);
MSumm:=New(TNVectorPTR);
MSummH:=New(TNVectorPTR);
MSummHH:=New(TNVectorPTR);
Diff1:=New(TNVectorPTR);

Cos_Phase:=New(TNVectorPTR);

WNtll:=New(TNVectorPTR);
Kn:=New(TNVectorPTR);

FBuf:=New(TNVectorPTR);
FortBuf:=New(TNVectorPTR);
New(Mik);
{-----}
{заполнение нулями}
FillChar(FortBuf^, SizeOf(FortBuf^),0);

```

```
FillChar(FBuff^, SizeOf(FBuff^),0);
FillChar(FScreen^, SizeOf(FBuff^),0);
FillChar(F1Screen^, SizeOf(FBuff^),0);
FillChar(Envelop1^, SizeOf(FBuff^),0);
FillChar(MSummH^, SizeOf(MSummH^),0);
FillChar(MSummHH^, SizeOf(MSummHH^),0);
FillChar(Diff1^, SizeOf(Diff1^),0);
FillChar(Cos_Phase^, SizeOf(Cos_Phase^),0);
```

```
FillChar(Mik^, SizeOf(Mik^),0);
```

```
Assign(newfile, NameOut);
```

```
  Rewrite(newfile,1);
```

```
  BlockWrite(newfile, FBuff^,no1*2, nss);
```

```
  Close(newfile);
```

```
  { копирование заголовка }
```

```
  Assign(newfile, NameIn);
```

```
  Reset(newfile,1);
```

```
  BlockRead(newfile,sss,SizeOf(sss), nss);
```

```
  Close(newfile);
```

```
Assign(newfile, NameOut);
```

```
  Reset(newfile,1);
```

```
  BlockWrite(newfile, sss,nss, nss);
```

```
  Close(newfile);
```

```
{-----}
```

```
  { Таблицы и константа }
```

```
  TestInput(Num2,Numberofbits,Error);
```





```

    { Вычисление огибающей (в начале - Q предыдущих значений) }
for i:=0 to numpoints-1 do Envelop1^[i+Q]:=AmplX(F^[i], Fort^[i]);
{-----}
    { НЧ-фильтрация огибающей суммированием }
    {положение: no-Q/2}
MSummL (Envelop1, Msumm, Q, numpoints);
    {положение: no-Q}
for i:=0 to numpoints-1 do MsummH^[i+Q2]:=Msumm^[i];

    { ВЧ-составляющая в огибающей }
    {положение: no-Q}
for i:=0 to numpoints-1 do Diff1^[i+Q2]:=Envelop1^[i+Q2]-Msumm^[i];

{Вычисление мгновенной фазы}
for i:=0 to numpoints-1 do
    if Envelop1^[i+Q]<>0 then Cos_Phase^[i+q]:= F^[i]/Envelop1^[i+Q]
        else Cos_Phase^[i+q]:= cos(PhaseX(F^[i], Fort^[i]));

{-----}
    {положение: no-3Q/2}
    if BoolCE then
        { экспандирование по мю-закону огибающей }
        for i:=0 to numpoints-1 do
            MsummHH^[i+Q]:=Level0/Maxmu*(exp(ln(1+Maxmu)*Msumm^[i]/level0)-1)

        else
            { компрессия по мю-закону огибающей НЧ }
            for i:=0 to numpoints-1 do
                MsummHH^[i+Q]:=Level0*ln(1+Maxmu*Msumm^[i]/Level0)/ln(1+Maxmu);
{-----}

```

```

{ НЧ-фильтрация огибающей суммированием }
{положение: по-Q}
MSummL (MsummHH, Envelop2, Q, numpoints);
{-----}
{пропорциональное изменение ВЧ}

for i:=0 to numpoints-1 do
begin
if MsummH^[i]>0 then Khf:=Envelop2^[i]/MsummH^[i];
Diff1^[i]:=Diff1^[i]*Khf;
end;

{-----}
for i:=0 to numpoints-1 do Envelop2^[i]:=Envelop2^[i]+Diff1^[i];
{-----}
{ восстановление сигнала (F1^ ) }
for i:=0 to numpoints-1 do F1^[i]:=Envelop2^[i]*Cos_Phase^[i];

{сохранение значений огибающей для суммирования}
for i:=0 to Q-1 do Envelop1^[i]:=Envelop1^[shift+i];
for i:=0 to Q-1 do MsummHH^[i]:=MsummHH^[numpoints+i];
for i:=0 to Q2-1 do MsummH^[i]:=MsummH^[numpoints+i];
for i:=0 to Q2-1 do Diff1^[i]:=Diff1^[numpoints+i];
{и cosph для восстановления}
for i:=0 to Q-1 do Cos_Phase^[i]:=Cos_Phase^[shift+i];
{-----}
{вывод в файл будет здесь}
for i:=0 to shift-1 do Mik^[i]:=Round(F1^[i]);
if Boole then for i:=0 to shift-1 do Mik^[i]:=Round(Envelop2^[i]);
BlockOutput ( shift, no, NameOut, Mik, nss);

```

```

{-----}
(* КАРТИНКИ*)

(*      msht:=zy/(2*35000);
for i:=shift to num2-1 do FScreen^[i]:=F^[i-shift];
for i:=shift to num2-1 do F1Screen^[i]:=F1^[i-shift];

GRAPHIC(0,screeny div 2, zy div 2, 10, screenx-10,
        Fscreen,numpoints,msht,'входной сигнал', true, true);

GRAPHIC(screeny div 2, screeny-10, (screeny div 4-5)*3,10, screenx-10,
        F1screen, numpoints,msht,'выходной сигнал', true, true);
FScreen^:=F^;
F1Screen^:=F1^;*)
{-----}

inc(no, Shift);
str(j1:6,sss);
outtextxy(600,20,sss);

inc(j1);

UNTIL num2 < 0;
(* конец обработки N временных выборок *)
lb1:      closegraph;
Dispose(F);
Dispose(F1);
Dispose(Fort);

Dispose(FScreen);
Dispose(F1Screen);

```

```
Dispose(XReal);
Dispose(XImag);
Dispose(SinTable);
Dispose(CosTable);

Dispose(Envelop1);
Dispose(Envelop2);
Dispose(Diff1);
Dispose(Cos_Phase);

Dispose(WNttl);
Dispose(Kn);

Dispose(FBuff);
Dispose(FortBuff);
Dispose(Mik);

end.{Program Chnl2.pas}
```

## Программы оценивания параметров сигнала

### Программа Dd.pas

```
(* оценивание динамического диапазона *)
(* накопление статистических частот *)
(* 50% перекрытие при синтезе ортогонального сигнала *)
uses crt,graph,fftb_1{,inpdata};
{$I grinit.inc}
{$I gr_pr.inc}
{$I win.inc}
{N+}
const
  NameIn='d:\gala\pas\chanal\wav\ch_cns.wav'; {исходный файл}
  NameOut='1.df'; {результатирующий файл - частоты}
  NameT='ch_cns.txt';
  Nump1=512{128}{1024}{256}; {длина выборки}
  K1=4;
  No1=40; {начало обработки}
  SizeF=32767;
  QH=0.98;
  QL=0.02;

Label
  lb1;

type
  LongFrame = array[0..K1*nump1] of integer;
  LongFramePTR = ^LongFrame;

real=extended;
```

str35=string[50];

var

mx, msht, por, T : single;  
screenx, screeny, Dd, Dm, zy : integer;  
d,ni, shift, j1, i, numlong : integer;  
numpoints, num2, nss : integer;  
no, nnn, noo : longint;  
SummF, ss, LimitL, LimitH : extended;  
DDd : extended;  
sss : string[64];  
ch : char;  
c, j : longint;  
NL, NH : integer;

Mik : LongFramePTR;

myfile : file of integer;  
newfile : file;  
Tfile : Text;

(\* описание библиотеки \*)

NumberOfBits : byte;  
XReal : TNVectorPTR;  
XImag : TNVectorPTR;  
SinTable : TNVectorPTR;  
CosTable : TNVectorPTR;  
F, Fort : TNVectorPTR;  
FScreen : TNVectorPTR;  
F1Screen : TNVectorPTR;  
Envelop1 : TNVectorPTR;

```

WNtll      : TNVectorPTR;
Kn         : TNVectorPTR;
FortBuff   : TNVectorPTR;
Error      : byte;
st : Integer;
(* ----- *)
{$I in_out.inc}
{$I ort.inc}
FUNCTION AmplX (xr, xi : single): single;
Begin
  AmplX:=sqrt(sqr(XR)+sqr(XI));
End;

(* ----- *)

Procedure WriteFd ( NameOut : str35;
                   M : LongFramePTR;
                   numpoints : integer);
{ накопление статистических частот мгновенных значений}
var
  Myfile : File of longint;
  i : integer;
  c : longint;
Begin
  {ВЫВОД в файл}
  Assign(myfile, NameOut);
  ReSet(myfile);

  for i:=0 to numpoints-1 do
  Begin

```

```

if M^[i] >=0 then
begin
Seek(myfile, M^[i]);
Read(myfile, c);
c:=c+1;
Write(myfile, c);
end;
End; {for}
Close(myfile);
End; {Procedure WriteFd}
(* ----- *)

```

```

Procedure Summ ( Name : str35; {суммирование значений}

```

```

    Number : integer;
    var S : extended);

```

```

var

```

```

i : integer;
myfile : file of longint;
c : longint;

```

```

Begin

```

```

S:=0;
Assign(myfile, Name);
ReSet(myfile);
for i:=0 to number-1 do
Begin
Seek(myfile, i);
Read(myfile, c);
S:=S+c;
End;

```



Close(myfile);

End;

(\* ----- \*)

Procedure SummUntil ( Name : str35; { суммирование значений }

Number : integer;

limit : extended;

var n : integer;

var ss : extended);

var

i : integer;

myfile : file of longint;

c : longint;

s : extended;

Begin

S:=0;

Assign(myfile, Name);

ReSet(myfile);

for i:=0 to number-1 do

Begin

Seek(myfile, i);

Read(myfile, c);

S:=S+c;

n:=i;

if s>=limit then exit;

End;

Close(myfile);

ss:=s;

End;

(\*\_\*)

BEGIN

numpoints:=Nump1;

numlong:=nump1\*K1; {длинная выборка}

Num2:=Nump1\*2;

no:=No1; {начало}

shift:=numpoints{ div 2}; {сдвиг}

grinit;

ClearDevice;

screenx:=getmaxx;

screeny:=getmaxy;

zy:=screeny div 2; zy:=zy-32;

msht:=90/20000;

{цвет фона}

SetBkColor(15);

{цвет линий}

SetColor(1);

{-----}

F:=NEW(TNVectorPTR);

Fort:=NEW(TNVectorPTR);

FScreen:=New(TNVectorPTR);

F1Screen:=New(TNVectorPTR);

XReal:=NEW(TNVectorPTR);

```

XImag:=NEW(TNVectorPTR);
SinTable:=NEW(TNVectorPTR);
CosTable:=NEW(TNVectorPTR);
Envelop1:=New(TNVectorPTR);
WNtll:=New(TNVectorPTR);
Kn:=New(TNVectorPTR);
FortBuff:=New(TNVectorPTR);
New(Mik);
{-----}
{заполнение нулями}
FillChar(FortBuff^, SizeOf(FortBuff^),0);
FillChar(FScreen^, SizeOf(F^),0);
FillChar(F1Screen^, SizeOf(F^),0);
(*-----*)
{заполнение нулями}
c:=0;
Assign(newfile, NameOut);
ReWrite(newfile,sizeof(c));
for j:=0 to Sizef do BlockWrite(newfile, c,1, nss);
Close(newfile);
{-----}
{Таблицы и константа}
TestInput(Num2,Numberofbits,Error);
if Error<>0 then
begin
Writeln('ОШИБКА!! Количество отсчетов должно быть');
Writeln('    два в степени N !!!');
Writeln(' преобразование проигнорировано...');
halt(1);
end;

```

```

MakeSinCosTable_fi(Num2,1,Sintable,Costable);
Koefficient_nattoll (num2, Kn);
for i:=0 to num2-1 do WNttll^[i]:=1;
Nattoll1(WNttll, num2, WNttll);
{-----}
j1:=0; {счетчик выборов}

REPEAT
  {остановка по нажатию esc}
  while keypressed do ch:=readkey;
if ch=#27 then break;
  {ввод сигнала}
BlockInput ( numlong, no, NameIn, Mik, numlong);
if numlong < Num2 then Goto Lb1; {выход}

For i:=0 to Num2 do F^[i]:=Mik^[i]; {исходный сигнал}

  {ортогональный сигнал}
Ort ( F, Fort, WNttll, FortBuff, Num2);

{Вычисление огибающей }
for i:=0 to numpoints-1 do Envelop1^[i]:=AmplX(F^[i], Fort^[i]);

for i:=0 to numpoints-1 do Mik^[i]:=Round(Envelop1^[i]);
  {запись в файл}
WriteFd ( NameOut, Mik, numpoints);
{-----}
  (* КАРТИНКИ*)
{-----}
for i:=0 to numpoints-1 do FScreen^[i]:=Envelop1^[i];

```

```

msht:=90/20000;
GRAPHIC(0,screeny div 2, zy div 2,0, screenx,
  FScreen,numpoints,msht,'входной сигнал', true, true);
{-----}
inc(no, Shift);
(*-----*)
str(j1:6,sss);
outtextxy(600,20,sss);

inc(j1);

UNTIL num2 < 0;
  (* конец обработки N временных выборок *)
lb1:      closegraph;
Dispose(F);
Dispose(Fort);
Dispose(FScreen);
Dispose(F1Screen);
Dispose(XReal);
Dispose(XImag);
Dispose(SinTable);
Dispose(CosTable);
Dispose(Envelop1);
Dispose(WNttll);
Dispose(Kn);
Dispose(FortBuff);
Dispose(Mik);
{обработка совокупности ст. частот}
  {суммирование значений}

```

```

Summ ( NameOut, SizeF, SummF);
LimitL:=QL*SummF;
LimitH:=QH*SummF;
SummUntil ( NameOut, SizeF, LimitL, NL, ss );
SummUntil ( NameOut, SizeF, LimitH, NH, ss );
DDd:=20*Ln(Nh/Nl)/Ln(10);
Writeln(Nl, Nh, DDd);

Assign(Tfile, NameT);
Rewrite(Tfile);
WriteLn(Tfile, Namein);
WriteLn(Tfile, 'общая сумма',SummF);
WriteLn(Tfile, 'значение ф-ии распределения','амплитуда');
WriteLn(Tfile, Qh, '          - ',Nh );
WriteLn(Tfile, QL, '          - ',NL);
WriteLn(Tfile,'динамический диапазон d=20*Lg(Nh/Nl)', DDd);
WriteLn(Tfile,'*****');
Close(Tfile);

readln;

end.{Program Dd.pas }

```

### Программа Osm2.pas

(\* вычисление относительной средней мощности (среднесекундной) \*)

```

uses crt;
{N+}
const

```

```

fm=16000; {нулевой уровень}
ist1='bach10.txt' ; (* ВЫХОДНОЙ файл *)
ist_2='bach_10.wav'; (* ВХОДНОЙ файл (сигнал)*)
type

real=single;
mas=array[0..520] of real;
tocka=array[0..512] of integer;
TNVectorPTR=^mas;
var
f_12          :tocka;
screenx,screeny      :integer;
NumPoints,i,j,z,n1,n2,k,sec,n :integer;
no,noo,nnn,zx       :longint;
p1,p01,s,p,po,t     :real;
msht,max,max1,am,lgmo   :real;
lgeo,mo,mo1,eo,max2,s2,max11  :real;
myfile,myfile_1,myfile_2   :file of integer;
rezfile           :text;
                  (* описание библиотеки *)
q1,x4,x3  : TNVectorPTR;
og,x02   : TNVectorPTR;
pw1      : TNVectorPTR;
pw,f_11  : TNVectorPTR;
(* ----- *)
(** ВВОД ДАННЫХ ИЗ ФАЙЛА В МАССИВ**)
PROCEDURE DATAINPUT(Num :integer;
                    no :longint;
                    var F_11 :Tnvectorptr);
VAR

```

```

i,zx:integer;
begin
Reset(myfile);
Seek(myfile,no);
for i:=0 to num-1 do
begin
  read(myfile,zx);
  f_11^[i]:=zx
end;
end;

Procedure DATAWRITE (t:real;pw:TNVectorPTR;
  og:TNVectorPTR;po:real;pw1:TNVectorPTR;po1:real;n:integer);
begin

append(rezfile);
writeln(rezfile,' входной файл: ',ist_2);
writeln(rezfile,' интервал усреднения, сек: ',t:1:0);
writeln(rezfile,' пиковое значение сигнала: ', max11:1:0);
writeln(rezfile,' нулевому уровню соответствует значение сигнала: ', fm:1);

  writeln(rezfile,' пиковые значения (среднеинтервальные), дБ: ');
for i:=1 to n do begin
if (i-round(i/5)*5)=0 then begin
  write(rezfile, (20*Ln(og^[i]/fm)/Ln(10)):12:3,' ');
  writeln(rezfile);
end else
write(rezfile, (20*Ln(og^[i]/fm)/Ln(10)):12:3,' '); end;
writeln(rezfile);

```



```

    writeln(rezfile,' среднеинтервальные ОСМ: ');
for i:=1 to n do begin
if (i-round(i/5)*5)=0 then begin
    write(rezfile,pw1^[i]:12:5,' ');
    writeln(rezfile);
end else
    write(rezfile, pw1^[i]:12:5,' '); end;
writeln(rezfile);

write(rezfile, ' усредненная ОСМ: ');
writeln(rezfile, po1:12:4);

    writeln(rezfile,' среднеинтервальные СМ /1000: ');
for i:=1 to n do begin
if (i-round(i/5)*5)=0 then begin
    write(rezfile,round(pw^[i]):12,' ');
    writeln(rezfile);
end else
    write(rezfile, round(pw^[i]):12,' '); end;
writeln(rezfile);

write(rezfile, ' усредненная СМ /1000:');
writeln(rezfile, round(po):12);
writeln(rezfile);
writeln(rezfile,
'*-----*');
end;

```

{ !!!! НАЧАЛО ПРОГРАММЫ !!!! }

BEGIN

```

clrscr;
NEW(f_11);
q1:=NEW(TNVectorPTR);
x4:=NEW(TNVectorPTR);
x3:=NEW(TNVectorPTR);
og:=NEW(TNVectorPTR);
x02:=NEW(TNVectorPTR);
pw:=NEW(TNVectorPTR);
pw1:=NEW(TNVectorPTR);

assign(rezfile,ist1);
rewrite(rezfile);

assign(myfile,ist_2);
reset(myfile);
nnn:=filesize(myfile);

gotoxy(1,1);
write( 'ЖДИТЕ, ИДУТ ВЫЧИСЛЕНИЯ ');

{ЧАСТОТА ДИСКРЕТИЗАЦИИ И ВРЕМЯ УСРЕДНЕНИЯ}
t:=1;
numpoints:=147; sec:=round(t*{22050}44100/numpoints);
zx:=32; max11:=0; max2:=0; s2:=0; k:=0; n:=0;

repeat

    datainput(numpoints,zx,x02);

    gotoxy(24,1);

```

```

writeln(round(100*zx/numn):3,'% ');

max:=0; s:=0;
for i:=0 to numpoints-1 do begin
if abs(x02^[i])>max then begin
max:=abs(x02^[i]);
max1:=max;
end;
if max>max11 then max11:=max;
q1^[i]:=sqr(x02^[i]/1000);
s:=s+q1^[i]; end;
x3^[k]:=max1; x4^[k]:=s;

if abs(x3^[k])>max2 then
max2:=x3^[k];
s2:=s2+x4^[k];

if k<sec-1 then inc(k) else begin
k:=0;
p:=s2/numpoints;
p:=p/sec;
p1:=2*p/sqr(max2/1000);
inc(n);
pw^[n]:=p*1000; pw1^[n]:=p1;
og^[n]:=max2;
{ writeln(p); } max2:=0;s2:=0;
end;

inc(zx,numpoints);

```

```
until zx>nnn-numpoints;
```

```
po:=0; po1:=0;
```

```
for i:=1 to n do begin
```

```
po:= po+pw[i]; po1:= po1+pw1[i]; end;
```

```
po:=po/n; po1:=po1/n;
```

```
{ запись результатов в выходной файл }
```

```
DATAWRITE(t,pw,og,po,pw1,po1,n);
```

```
write(#7);
```

```
close(rezfile); close(myfile); dispose(f_11); dispose(pw);
```

```
dispose(pw1); dispose(og); dispose(x02); dispose(q1); dispose(x3);
```

```
dispose(x4);
```

```
END.
```

## Программа ARUR\_KL

## Программа Err\_s

(\* оценивание среднеквадратического отклонения сигналов \*)

```
uses crt,graph,fftb_1{,inpdata};
```

```
{ $I grinit.inc }
```

```
{ $I gr_pr.inc }
```

```
{ $I win.inc }
```

```
{ N+ }
```

```
const
```

```
NameIn1='d:\gala\pas\chanal\wav\toro.wav'; {исходный файл 1}
```

```
NameIn2='d:\gala\pas\chanal\wav\0_.wav'; {исходный файл 2}
```

```
Nameout='d:\gala\pas\chanal\wav\__.wav'; {исходный файл 2}
```

```
BoolOut=false; {true- вывод в файл}
```

```
BoolR=true; {true - остановка на каждом кадре}
```

```
NameT='ch_err.txt';
```

```
Nump1=512; {длина выборки}
```

```
K1=1;
```

```
No1=4200; {начало обработки}
```

```
N_shift=2048+120;
```

```
Label
```

```
lb1;
```

```
type
```

```
LongFrame = array[0..K1*nump1] of integer;
```

```
LongFramePTR = ^LongFrame;
```

```
real=extended;
```

```
str35=string[50];
```



```
grinit;
ClearDevice;
screenx:=getmaxx;
screeny:=getmaxy;
zy:=screeny div 2; zy:=zy-32;
msht:=90/20000;
```

```
{цвет фона}
```

```
SetBkColor(15);
```

```
{цвет линий}
```

```
SetColor(1);
```

```
{-----}
```

```
F:=NEW(TNVectorPTR);
```

```
F1:=NEW(TNVectorPTR);
```

```
F2:=NEW(TNVectorPTR);
```

```
Error:=NEW(TNVectorPTR);
```

```
New(Mik);
```

```
{-----}
```

```
{заполнение нулями}
```

```
FillChar(F^, SizeOf(F^),0);
```

```
FillChar(F1^, SizeOf(F1^),0);
```

```
(*-----*)
```

```
Assign(newfile, NameOut);
```

```
ReWrite(newfile,1);
```

```
BlockWrite(newfile, F^,no1*2, nss);
```

```
Close(newfile);
```

```
{ копирование заголовка }
```

```
Assign(newfile, NameIn1);  
Reset(newfile,1);  
BlockRead(newfile,sss,SizeOf(sss), nss);  
Close(newfile);
```

```
Assign(newfile, NameOut);  
Reset(newfile,1);  
BlockWrite(newfile, sss,nss, nss);  
Close(newfile);
```

```
{-----}
```

```
j1:=0; {счетчик выборок}
```

```
NEx:=0;
```

```
SumD:=0;
```

```
SumF:=0;
```

```
mx:=0;
```

```
REPEAT
```

```
  {остановка по нажатию esc}
```

```
  while keypressed do ch:=readkey;
```

```
  if ch=#27 then break;
```

```
{ввод сигнала}
```

```
BlockInput ( numlong, no, NameIn1, Mik, numlong);
```

```
if numlong < 1 then Goto Lb1; {выход}
```

```
For i:=0 to Numpoints-1 do F^[i]:=Mik^[i]; {исходный сигнал 1}
```

```
BlockInput ( numlong, noo, NameIn2, Mik, numlong);
```

```
if numlong < 1 then Goto Lb1; {выход}
```



```
For i:=0 to Numpoints-1 do F1^[i]:=Mik^[i];
```

```
for i:=0 to numpoints-1 do
```

```
  Begin
```

```
    T:=(F1^[i]-F^[i]);
```

```
    F2^[i]:=F^[i]-T;
```

```
    Error^[i]:=t;
```

```
    if mx<t then
```

```
      begin
```

```
        mx:=t;
```

```
        nm:=noo;
```

```
      end;
```

```
    if mxf<abs(F^[i]) then mxf:=Abs(F^[i]);
```

```
    SumD:=SumD+T*T;
```

```
    SumF:=SumF+F^[i]*F^[i];
```

```
    Nex:=Nex+1;
```

```
  end;
```

```
{-----}
```

```
{ВЫВОД В ФАЙЛ БУДЕТ ЗДЕСЬ}
```

```
if BoolOut then
```

```
  begin
```

```
    for i:=0 to shift-1 do Mik^[i]:=Round(F2^[i]);
```

```
    BlockOutput ( shift, no, NameOut, Mik, nss);
```

```
  end;
```

```
    (* КАРТИНКИ*)
```

```
{-----}
```

```
  zy:=screeny div 3;
```

```
  msht:=zy/40000;
```

```

GRAPHIC(0,zy, zy div 2,0, screenx, F, numpoints, msht,
        ' сигнал-1', true, true);
GRAPHIC(zy, 2*zy, zy+zy div 2,0, screenx,
        F1,numpoints,msht,' сигнал -2', true, true);

GRAPHIC(2*zy, 3*zy, 2*zy+zy div 2,0, screenx,
        Error,numpoints,msht,' error', true, true);
{-----}
inc(no, Shift);
inc(noo, Shift);
(*-----*)
str(j1:6,sss);
outtextxy(600,20,sss);

if (Nex>1) and (SumD>0) then T:=sqrt(SumD/(NEx-1));
str(T:8:3,sss);
outtextxy(150,180,sss);

if boolR then ch:=readkey;
if ch=#27 then break;

inc(j1);

UNTIL num2 < 0;
(* конец обработки N временных выборок *)
lb1: closegraph;
Dispose(F);
Dispose(F1);
Dispose(F2);
Dispose(Error);

```

Dispose(Mik);

(\*-----\*)

if (Nex>1) and (SumD>0) then T:=sqrt(SumD/(NEx-1));

if (Nex>1) and (SumF>0) then T1:=sqrt(SumF/(NEx-1));

WriteLn('среднеквадратическая ошибка =' ,T );

WriteLn('среднеквадратическое значение сигнала =' ,T1);

WriteLn('относительная среднеквадратическая ошибка =' ,T/T1\*100:6:3, '%');

WriteLn('максимальная ошибка =' ,mx:8:2);

WriteLn('номер =' ,nm);

WriteLn('mx/mxf,% =' ,mx/mxf\*100:8:2);

(\* Assign(Tfile, NameT);

Rewrite(Tfile);

WriteLn(Tfile, Namein1);

WriteLn(Tfile, 'общая сумма',SumF);

WriteLn(Tfile, 'значение ф-ии распределения','амплитуда');

WriteLn(Tfile, ' - ', Nh );

WriteLn(Tfile, ' - ',NL);

WriteLn(Tfile,');

WriteLn(Tfile,'\*\*\*\*\*');

Close(Tfile);\*)

readln;

end.

## **ПРИЛОЖЕНИЕ 2**

### **Рекомендации по использованию алгоритмов и устройства.**

На основе результатов, полученных в предыдущей главе, сформируем общие рекомендации по предварительной и восстановительной обработке речевого сигнала в СПРС.

Для этого проведем анализ результатов, полученных в предыдущей главе. Сведем результаты проведенных экспериментов в единую таблицу: Рассмотрим сначала энергетические параметры, их деградацию при кодировании, влияние на их значения обработки ПВК.

### **Статистика ОСМ**

Таблица 5.1.

<b>Сигнал без дополнительной обработки</b>				
<b>СИГНАЛЬНЫЕ ИОСМ</b>				
Параметры	<b>Тип сжатия</b>			
	Без сжатия	16 кбит/с	8 кбит/с	4.8 кбит/с
Среднее	0,111	0,108	0,106	0,1
СКО	0,0593	0,0588	0,0582	0,0568
Медиана	0,102	0,096	0,09	0,086
ИАОС	–	0,157	0,207	0,225
<b>Сигнальные дифференциальные ИОСМ</b>				
Среднее	0	0	0	0
СКО	0,0752	0,0736	0,073	0,0728
Медиана	0	0	0	0
ИАОС	–	0,139	0,147	0,17
<b>Канальные ИОСМ</b>				
Среднее	0,0114	0,0114	0,0107	0,00982
СКО	0,0102	0,0102	0,0968	0,00924
Медиана	0,009	0,009	0,00843	0,00769
ИАОС	–	0,153	0,167	0,178
<b>Канальные дифференциальные ИОСМ</b>				
Среднее	0	0	0	0
СКО	0,0125	0,0126	0,012	0,0119
Медиана	0	0	0	0
ИАОС	–	0,139	0,143	0,149

Таблица 5.2

<b>Сигнал с обработкой ПВК до кодека</b>				
<b>Сигнальные ИОСМ</b>				
Параметры	<b>Тип сжатия</b>			
	Без сжатия	16 кбит/с	8 кбит/с	4.8 кбит/с
Среднее	0,227	0,157	0,149	0,126
СКО	0,138	0,0816	0,0734	0,00699
Медиана	0,198	0,15	0,127	0,125
ИАОС	–	0,486	0,572	0,624
<b>СИГНАЛЬНЫЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ИОСМ</b>				
Среднее	0	0	0	0
СКО	0,153	0,0967	0,0952	0,0904
Медиана	0	0	0	0
ИАОС	–	0,301	0,344	0,372
<b>Канальные ИОСМ</b>				
Среднее	0,0936	0,0938	0,0965	0,122
СКО	0,148	0,146	0,14	0,0867
Медиана	0,00798	0,00792	0,00741	0,00609
ИАОС	–	1,07	1,12	1,19
<b>КАНАЛЬНЫЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ИОСМ</b>				
Среднее	0	0	0	0
СКО	0,233	0,225	0,221	0,202
Медиана	0	0	0	0
ИАОС	–	1,27	1,29	1,36

Таблица 5.3

Сигнал с обработкой ПВК после кодека				
<b>СИГНАЛЬНЫЕ ИОСМ</b>				
Параметры	Тип сжатия			
	Без сжатия	16 кбит/с	8 кбит/с	4.8 кбит/с
Среднее	0,227	0,161	0,153	0,139
СКО	0,138	0,0846	0,0822	0,0764
Медиана	0,198	0,15	0,138	0,127
ИАОС	–	0,458	0,498	0,609
<b>СИГНАЛЬНЫЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ИОСМ</b>				
Среднее	0	0	0	0
СКО	0,153	0,106	0,978	0,0908
Медиана	0	0	0	0
ИАОС	–	0,293	0,313	0,347
Канальные ИОСМ				
Среднее	0,0936	0,0922	0,0915	0,0902
СКО	0,148	0,148	0,142	0,0877
Медиана	0,00798	0,00792	0,00743	0,00613
ИАОС	–	1,07	1,12	1,17
<b>КАНАЛЬНЫЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ИОСМ</b>				
Среднее	0	0	0	0
СКО	0,233	0,228	0,226	0,206
Медиана	0	0	0	0
ИАОС	–	1,21	1,22	1,24

Таблица 5.4

<b>СИГНАЛ С ОБРАБОТКОЙ ПВК ДО И ПОСЛЕ КОДЕКА</b>				
<b>СИГНАЛЬНЫЕ ИОСМ</b>				
Параметры	<b>ТИП СЖАТИЯ</b>			
	Без сжатия	16 кбит/с	8 кбит/с	4.8 кбит/с
Среднее	0,227	0,203	0,196	0,157
СКО	0,138	0,0972	0,0922	0,0873
Медиана	0,198	0,172	0,152	0,133
ИАОС	–	0,684	0,722	0,826
<b>СИГНАЛЬНЫЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ИОСМ</b>				
Среднее	0	0	0	0
СКО	0,153	0,126	0,107	0,0988
Медиана	0	0	0	0
ИАОС	–	0,393	0,428	0,563
<b>Канальные ИОСМ</b>				
Среднее	0,0936	0,0928	0,0922	0,0911
СКО	0,148	0,148	0,145	0,102
Медиана	0,00798	0,00796	0,00755	0,00719
ИАОС	–	1,321	1,377	1,47
<b>КАНАЛЬНЫЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ИОСМ</b>				
Среднее	0	0	0	0
СКО	0,233	0,239	0,231	0,231
Медиана	0	0	0	0
ИАОС	–	1,36	1,38	1,53



з данных, полученных для канальных ИОСМ, видно, что наибольшему влиянию канала с высокоэффективным устранением избыточности подвержены сигналы с целенаправленной на увеличение ОСМ предварительной обработкой. Тем не менее, современные алгоритмы (например, реализованные в аудиопроцессоре ПВК) позволяют провести обработку, которая даже после изменений, вносимых каналом, обеспечивает большую мощность сигнала, нежели в случае применения классических алгоритмов обработки.

Дифференциальные канальные ИОСМ, оценивающие громкостные соотношения внутри сигнала, характеризуются изменением СКО, т.е. изменением диапазона перепадов громкостей. По результатам измерений, наименьшей деградации подвергаются предварительно не обработанные сигналы. Параметры сигналов с классической обработкой также незначительно ухудшаются с увеличением степени сжатия. Эффективная предварительная обработка в большей степени подвержена разрушению, но при этом, тем не менее, обеспечивает лучшие характеристики сигнала.

Из данных по сигнальным и дифференциальным сигнальным ИОСМ видно, что искажения незначительно сказываются на структурных свойствах сигнала.

Критерием оценки является ИАОС, шкалирование которых должно быть произведено с использованием ССИ.

### **Спектральная статистика**

Таблица 5.5.

Сигнал без дополнительной обработки				
Параметры	ТИП СЖАТИЯ			
	Без сжатия	16 кбит/с	8 кбит/с	4.8 кбит/с
Среднее	–	2,093256	3,115555	3,68027
СКО	–	2,093256	3,115555	3,68027
ИО	–	0,2609241	0,3955676	0,1781309

Таблица 5.6.

Сигнал с динамической обработкой ПВК до кодека				
Параметры	Тип сжатия			
	Без сжатия	16 кбит/с	8 кбит/с	4.8 кбит/с
Среднее	–	26,11979	34,39659	25,77036
СКО	–	26,11979	34,39659	25,77036
ИАОС	–	0,3355621	0,2785173	0,3299185

Таблица 5.7.

Сигнал с динамической обработкой ПВК после кодека				
Параметры	Тип сжатия			
	Без сжатия	16 кбит/с	8 кбит/с	4.8 кбит/с
Среднее	–	165,0079	81,80244	196,9531
СКО	–	165,0079	81,80244	196,9531
ИАОС	–	0,8924915	0,5014626	0,6645327

Таблица 5.8.

Сигнал с динамической обработкой ПВК до и после кодека				
Параметры	Тип сжатия			
	Без сжатия	16 кбит/с	8 кбит/с	4.8 кбит/с
Среднее	–	40,83879	22,56378	56,56329
СКО	–	40,83879	22,56378	56,56329
ИАОС	–	0,6452152	0,4736284	0,5788121

Анализируя данные, приведенные выше, а также графики из предыдущей главы делаем следующие выводы:

В процессе кодирования нарушаются энергетические параметры РС, происходит резкое снижение ОСМ, что приводит к изменению динамического диапазона, нарушению формы сигнала, появлению в паузах паразитных синусоидальных помех.

Нарушаются частотные свойства сигнала, особенно в области высоких частот – искажение спектра, появление мощных узкополосных высокочастотных помех, что в целом снижает разборчивость речи – самый важный параметр речевого сигнала.

Мы видим, что применение предварительной и восстановительной обработки улучшает параметры речевого сигнала. Попытаемся оценить степень субъективного улучшения качества сигнала, используя имеющиеся данные об экспертных оценках изменения качества сигнала по шкале MOS при его сжатии кодеками с различной скоростью.

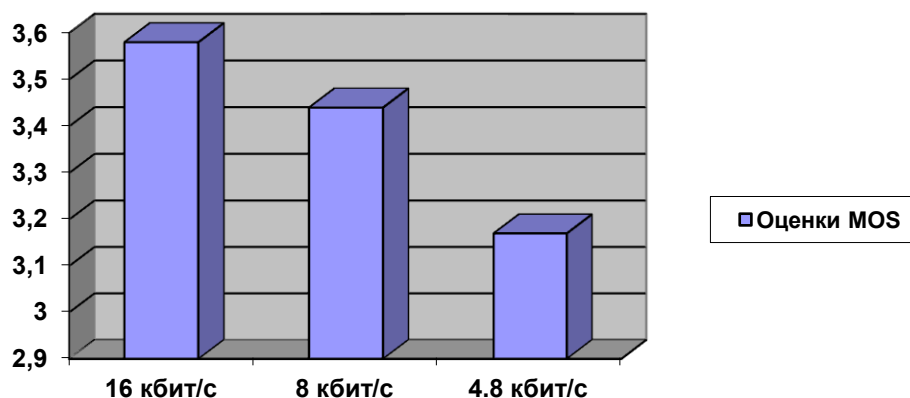


Рис. 5.1.

Сопоставим данные оценок MOS с результатами исследований. Получаем, что наиболее точно изменение субъективных оценок иллюстрирует интегральная оценка ИАОС, что позволяет с определенной точностью спрогнозировать изменение экспертных оценок качества сигнала при его обработке алгоритмом ПВК и оценить преимущества ПВК с точки зрения слушателя по сравнению с классическим компенсатором искажений.

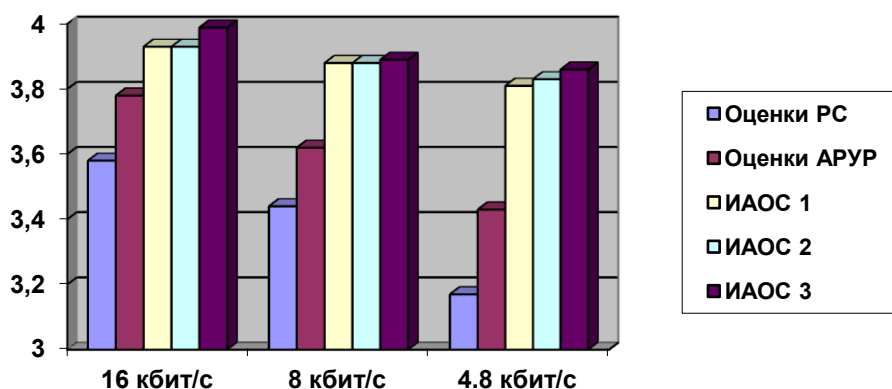


Рис. 5.2.

На Рис. 5.2 первый столбец гистограммы показывает значения оценок MOS для необработанного кодированного РС, второй – для РС, обработанного компенсатором искажений на входе кодека. Третий, четвертый и пятый столбцы гистограммы представляют собой значения ИАОС, представленные в масштабе первых двух столбцов и позволяющие приблизительно оценить улучшение оценок MOS для случаев установки ПВК до кодека, после кодека и в обоих случаях.

Мы видим, что использование ПВК в качестве восстановительного корректора эффективнее, чем в качестве предварительного. Это объясняется тем, что структура сигнала в кодере разрушается в любом случае, и большой процент внесенных улучшений теряется при кодировании. Лучший результат достигается при установке ПВК на входе и выходе канала. Таким образом, рекомендуется установка ПВК и на передающем, и на приемном конце радио тракта. В случае, если это невозможно, предпочтительно наличие устройства обработки на выходе кодека.