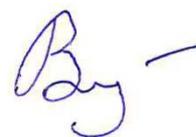


На правах рукописи



ЛУКИН ВЛАДИМИР НИКОЛАЕВИЧ

**МОДЕЛИ И МЕТОДИКИ СТАТИСТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ
ПРОЦЕССОМ ПЕРЕДАЧИ ГОЛОСОВОГО ТРАФИКА**

05.02.23 – «Стандартизация и управление качеством продукции»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2015

Работа выполнена на кафедре менеджмента и систем качества федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)».

Научный руководитель:

Яценко Владимир Владимирович
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Клячкин Владимир Николаевич
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Прикладная математика и информатика» ФГБОУ ВПО «Ульяновский государственный технический университет»

Гродзенский Яков Сергеевич

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Метрология и стандартизация» ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет информационных технологий, радиотехники и электроники»

Ведущая организация:

ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. Бонч-Бруевича»,
193232, г. Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, корп. 1

Защита состоится «15» октября 2015 года в 15.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.233.04 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по адресу: 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по адресу: 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67 и на сайте <http://guap.ru/dissov>.

Автореферат разослан «07» сентября 2015 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.233.04,
кандидат технических наук, доцент



Фролова Е.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Современная тенденция развития стандартов на системы менеджмента качества (СМК) демонстрирует все больше примеров прямого указания на приведение процессов в стабильное состояние и/или поиск коренной причины, приводящей к нежелательной изменчивости процессов. Здесь можно сослаться как непосредственно на отраслевые требования к СМК (в частности, ИСО/ТУ 16949-2009, п. 7.5.1.1, IRIS, п. 8.3.1), так и на руководства по применению статистических методов при реализации требований ISO/DIS 9001:2014 (например, ГОСТ Р ИСО/ТО 10017-2005. Статистические методы. Руководство по применению в соответствии с ГОСТ Р ИСО 9001). И в этом контексте одним из важнейших условий предоставления организацией продукции (и услуг) высокого уровня качества, является корректная диагностика состояния стабильности процессов (ДССП). Она даёт ответ на вопрос: «Процесс стабилен или нестабилен?». Минимизация ошибок идентификации состояния стабильности процесса 1-го рода (ложная тревога) и 2-го рода (пропуск сигнала) позволяет организациям сократить потери и повысить качество предоставляемой продукции (и услуг).

Для телекоммуникационной компании, предоставляющей услуги передачи голосового трафика, крайне важно оперативно выявлять случаи ухудшения качества связи и предпринимать действия по устранению их причин. Отсутствие оперативного и результативного мониторинга процесса передачи голосового трафика приводит к высоким рискам потери клиента, а, соответственно, и к возможным финансовым потерям организации. Средняя длительность телефонного разговора, *ACD*, и коэффициент успешности соединения, *ASR*, (из стандарта ITU-T Recommendation E.411 и ряда руководств по использованию телекоммуникационного программного обеспечения) являются отраслевыми характеристиками качества процесса передачи голосового трафика, используемыми транзитными операторами связи. Временным рядам значений этих характеристик свойственна сложная структура данных (циклостационарность, асимметрия распределения и др.).

Используемые в телекоммуникациях методы статистического мониторинга процесса передачи голосового трафика (в которых пороговые значения могут быть заданы на основе отраслевой практики (экспертом) или на основе анализа временных рядов) приводят к совершению большого количества ошибок 1-го и 2-го рода, так как плохо учитывают (или вовсе не учитывают) сложную структуру данных, свойственную временным рядам значений характеристик *ACD* и *ASR*.

Статистическому управлению процессами (СУП) со сложной структурой данных посвящены работы как российских (Ю.П. Адлер, Я.С. Гродзенский, В.В. Ефимов, О.И. Илларионов, В.Н. Клячкин, Л.А. Кузнецов, В.И. Нечаев, А.И. Орлов, М.И. Розно, В.Л. Шпер, В.В. Яценко и др.), так и зарубежных учёных (Б. Аббаси, Л. Алван, Дж. Бокс, В. Вудал, М. Кху, Д. Монтгомери, Р. Нельсон, У. Паджетт, Д. Уиллер, Ф. Чубине и др.). Однако существующие методики СУП лишь частично учитывают структуру данных, свойственную временным рядам значений характеристик *ACD* и *ASR* (циклостационарность, асимметрию распределения данных и т.д.).

Помимо отрасли электро- и радиосвязи, процессы со схожей (частично) структурой данных присутствуют в таких отраслях, как химическая промышленность, машиностроение и металлообработка, промышленность строительных материалов, информационно-вычислительное обслуживание.

В связи с вышесказанным, актуальной задачей является разработка методик СУП передачи голосового трафика, способных улучшить качество ДССП, что и обусловило выбор темы диссертационной работы.

Целью диссертационного исследования является улучшение качества ДССП передачи голосового трафика на основе разработки моделей и методик СУП.

Основные задачи исследования:

1. Провести анализ пригодности существующих методов СУП применительно к передаче голосового трафика.
2. Разработать модели и методики СУП передачи голосового трафика.
3. Провести сравнительный анализ качества ДССП передачи голосового трафика методик построения карт контроля.
4. Определить оптимальные параметры плана контроля процесса передачи голосового трафика.

Объектом исследования является процесс передачи голосового трафика.

Предметом исследования являются методы СУП передачи голосового трафика.

Основными методами исследования являются методы математического моделирования случайных процессов, методы сравнения чувствительности контрольных карт (КК) и методы экономического планирования КК.

Показатели качества ДССП, используемые в диссертационной работе:

- оценки вероятностей совершения ошибок 1-го и 2-го рода;
- оценка суммарных потерь от ошибок 1-го и 2-го рода (комплексный показатель).

Область исследования соответствует пунктам 1. «Методы анализа, синтеза и оптимизации, математические и информационные модели состояния и динамики качества объектов», 2. «Стандартизация, метрологическое обеспечение, управление качеством и сертификация», 3. «Методы стандартизации и менеджмента (контроль, управление, обеспечение, повышение, планирование) качества объектов и услуг на различных стадиях жизненного цикла продукции», 4. «Квалиметрические методы оценки качества объектов, стандартизации и процессов управления качеством» паспорта специальности 05.02.23 – «Стандартизация и управление качеством продукции».

Основные результаты и положения, выносимые на защиту:

1. Модель процесса передачи голосового трафика.
2. Методика построения КК стационарного процесса с асимметричным распределением значений характеристики, основанная на аналитической связи между моментами и параметрами функции распределения и параметрической бутстреп-процедуре (ПБ-процедуре) вычисления контрольных пределов.
3. Методика построения КК циклостационарного процесса, основанная на вычислении контрольных пределов по точкам, расположенным относительно друг друга на расстояниях целого числа периодов (в которых процесс стационарен), и оценке состояния стабильности циклостационарного процесса при помощи критериев серий.
4. Методика экономического планирования КК процесса со сложной структурой, в которой использованы современные возможности хранения и анализа большого объема информации.

5. Система методик СУП передачи голосового трафика, позволяющая улучшить качество ДССП.

Научная новизна диссертационного исследования:

1. Разработана методика построения КК стационарного процесса с асимметричным распределением значений характеристики, основанная на ПБ-процедуре. Новизна методики заключается в вычислении робастных оценок параметров распределения, использование которых позволяет рассчитывать корректные оценки контрольных пределов на основе частично неоднородных данных.

2. Разработана методика построения КК циклостационарного процесса. Разработанная методика, в отличие от альтернативных, основана на вычислении контрольных пределов по точкам, расположенным относительно друг друга на расстояниях целого числа периодов.

3. Разработана методика экономического планирования КК процесса со сложной структурой. Новизна методики заключается в вычислении значения суммарных потерь от ошибок 1-го и 2-го рода на основе данных из ранее анализированных практических ситуаций (в отличие от альтернативных методик, предлагающих вычислять вероятности ошибок 1-го и 2-го рода на основе теоретических моделей распределения).

4. Впервые проведён сравнительный анализ качества ДССП разработанной и альтернативных методик построения КК процесса со сложной структурой на основе показателя суммарных потерь от ошибок 1-го и 2-го рода.

Теоретическая значимость работы. На основе сравнительного анализа качества ДССП разработанных и альтернативных методик построения КК доказано, что при определённых условиях разработанные методики являются оптимальными. Расширена область применения экономического планирования КК: разработанная методика позволяет определять оптимальные параметры плана контроля не только стационарного, но и нестационарного процесса.

Практическая значимость работы:

1. Разработаны модели временных рядов значений отраслевых характеристик (ACD , ASR) процесса передачи голосового трафика.

2. Разработана методика построения КК процесса передачи голосового трафика, учитывающая его сложную структуру.

3. Проведён сравнительный анализ качества ДССП разработанной и альтернативных методик построения КК для процесса передачи голосового трафика (на примере временного ряда значений ACD). Показано, что качество ДССП разработанной методики в 2 раза (и более) превосходит качество ДССП альтернативных методик, что эквивалентно двукратному сокращению потерь в финансовом выражении.

4. При помощи разработанной методики экономического планирования КК процесса со сложной структурой найдены оптимальные параметры плана контроля процесса передачи голосового трафика, характеризующегося временным рядом значений ACD .

5. Помимо отрасли электро- и радиосвязи, разработанные в диссертации методики могут применяться для ДССП со сложной структурой из таких отраслей, как химическая промышленность, машиностроение и металлообработка, промышленность строительных материалов, информационно-вычислительное обслуживание и др.

Достоверность научных результатов подтверждается корректностью применения математического аппарата и компьютерного моделирования, адекватностью экспертных оценок,

положительными результатами использования методик, предложенных в диссертации, на практике, а также публикацией и обсуждением основных результатов исследований.

Апробация и внедрение результатов работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на 6 научно-технических и научно-практических конференциях, в их числе: XIII Международная научно-практическая конференция «Управление качеством» (МАТИ, Москва, 2014 г.), VIII и VI Всероссийские научно-практические конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Современные проблемы менеджмента» (СПбГЭТУ, Санкт-Петербург, 2014 – 2015 гг.), IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conferences (Санкт-Петербург, 2014 – 2015 гг.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 12 научных работ, в том числе 5 публикаций в ведущих рецензируемых научных изданиях.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и приложений. Список литературы включает 107 наименований. Основная часть работы изложена на 123 страницах, иллюстрирована 20 рисунками и содержит 14 таблиц (включая таблицы из приложений).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цель и основные задачи исследования. Показаны научная новизна, теоретическая и практическая значимости диссертационной работы. Приведены основные положения, выносимые на защиту, сведения об апробации и внедрении результатов работы.

В первой главе описан процесс передачи голосового трафика при помощи структурной схемы процесса и модели системы управления процессом с обратной связью (рис. 1).

Оператор-клиент на основе информации из файлов CDR, а также (в некоторых случаях) при помощи информации из жалоб абонентов и аудиозаписей звонков, производит анализ качества передачи голосового трафика. Основными инструментами анализа качества передачи голосового трафика, используемыми оператором-клиентом, являются методы статистического мониторинга процесса. В случае неудовлетворительного качества передачи голосового трафика «голос потребителя» (оператора-клиента) может быть выражен двумя способами:

- транзитному оператору может быть отправлена жалоба (trouble ticket) с требованием улучшить качество передачи голосового трафика;
- через транзитного оператора может быть прекращена передача голосового трафика.

Если в первом случае транзитный оператор ещё может провести корректирующие действия по устранению причины проблемы, то во втором случае транзитному оператору гораздо сложнее исправить ситуацию, и он несёт значительные финансовые потери от снятия клиентского трафика. Таким образом, управление только на основе «голоса потребителя» является неэффективным. Гораздо более эффективным является управление на основе «голоса процесса». Обычно ухудшение качества передачи голосового трафика происходит практически мгновенно (а не постепенно), что сразу отражается на статистических характеристиках процесса. Поэтому задача транзитного оператора, в первую очередь, сводится к *максимально оперативной идентификации ухудшения качества передачи голосового трафика* (при помощи методов статистического мониторинга процесса). Такая оперативная идентификация позволит своевременно искать и устранять причины ухудшения качества передачи голосового трафика (до того, как наличие ухудшения качества обнаружит оператор-клиент). При реализации подобной стратегии поиска и

устранения причин – для транзитного оператора его действия будут корректирующими (так как являются реакцией на обнаруженное им несоответствие), а по отношению к оператору-клиенту действия транзитного оператора будут предупреждающими (так как они выполняются до обнаружения оператором-клиентом несоответствия).



Рис. 1 – Модель системы управления процессом с обратной связью

Исследованы основные характеристики процесса передачи VoIP - трафика (в том числе характеристики QoS (производительность сети, джиттер, потери и задержки пакета IP) и MOS (среднее значение экспертной оценки)) из стандартов Международного союза электросвязи (ITU). Выделены характеристики, используемые транзитными операторами связи для мониторинга и анализа качества передачи голосового трафика: *ACD* (средняя длительность телефонных разговоров) и *ASR* (коэффициент успешности соединения).

Значение характеристики *ACD* вычисляется исходя из формулы:

$$ACD = \sum_{j=1}^n CD_j / n, \quad (1)$$

где CD_j – длительность j -го телефонного разговора; j – номер разговора в подгруппе; n – количество телефонных разговоров (с длительностью) в подгруппе.

Значение характеристики *ASR* вычисляется по формуле:

$$ASR = \frac{n}{r} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где r – общее количество попыток дозвониться в подгруппе.

Существуют две основные причины, по которым для мониторинга качества трафика транзитный оператор использует характеристики *ACD* и *ASR*: комплексность этих характеристик, а также их связь с финансовым показателем (маржи).

Модель процесса передачи голосового трафика может быть описана через модели временных рядов значений характеристик процесса (*ACD* и *ASR*). Для этого было выбрано несколько телекоммуникационных направлений транзитного оператора, по которым передавался голосовой трафик клиента. Для каждого выбранного направления был собран большой объём данных о телефонных звонках. Для обеспечения условий стабильности процесса передачи голосового трафика экспертами был проведён анализ качества связи (анализировались аудиозаписи звонков и причины их разъединения) в соответствии с рекомендациями ITU-T P.800 и ITU-T Q.931.

Свойства временных рядов значений характеристик *ACD* и *ASR* исследованы посредством:

- анализа их выборочных автокорреляционных функций;
- статистических проверок гипотез о принадлежности значений каждой из характеристик теоретическому закону распределения (с помощью критерия согласия χ^2 Пирсона);

– выявления корреляционной зависимости между значениями характеристик ACD и ASR .

В результате исследования выявлены следующие свойства временного ряда ACD :

- циклостационарность временного ряда значений ACD (а также циклостационарность значений моментов распределения величин ACD);
- асимметричное распределения значений характеристики ACD (значения CD распределены в соответствии с логарифмически нормальным законом);
- неравный объём выборки (на основе которой вычисляются значения ACD) в подгруппах.

На рис. 2 представлена модель временного ряда значений ACD .

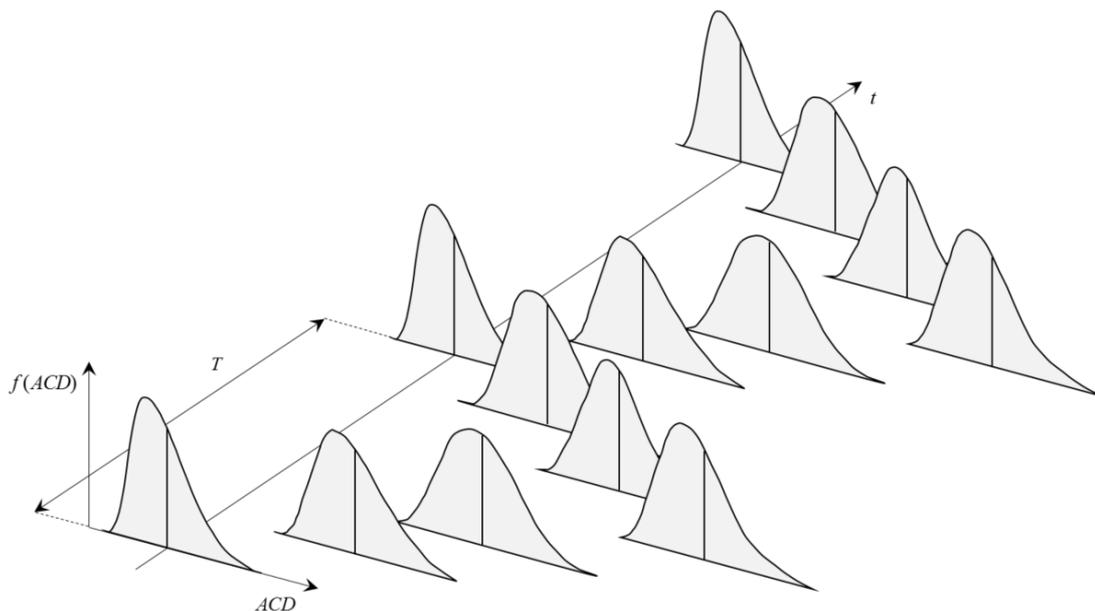


Рис. 2 – Модель стабильного процесса передачи голосового трафика, характеризующегося временным рядом значений ACD

Свойства временного ряда значений ASR аналогичны свойствам временного ряда значений ASR , за исключением того, что значения характеристики ASR распределены в соответствии с биномиальным законом. В результате анализа взаимосвязи между величинами ACD и ASR выявлено, что их корреляция является крайне слабой или отсутствует.

Свойства временных рядов значений ACD и ASR также характерны временным рядам (процессам) из других отраслей. Так асимметричное распределение значений характеристики свойственны процессам из следующих отраслей: химическая промышленность (наработка полупроводникового устройства на отказ), машиностроение и металлообработка (отклонение формы поверхности от круглости), промышленность строительных материалов (предел прочности материала на разрыв). А в отрасли электро- и радиосвязи процесс передачи трафика, характеризующийся временными рядами значений количества переданных байт и пакетов трафика, имеет циклостационарную структуру данных.

Рассмотрены основные методы статистического мониторинга процесса передачи голосового трафика, используемые транзитными операторами связи на практике. Описана методика Брутлага, наиболее распространённая среди транзитных операторов голосового трафика при мониторинге временных рядов характеристик ACD и ASR . Анализ методики Брутлага показал, что её (методики)

использование при мониторинге временных рядов значений ACD и ASR приводит к частому совершению ошибок 1-го и 2-го рода при принятии гипотезы о качестве передачи голосового трафика. Таким образом, необходимы более результативные методики мониторинга процесса передачи голосового трафика.

Во второй главе выделены два подхода к СУП на основе КК: операциональный и вероятностный. В рамках вероятностного подхода учитываются свойства конкретного процесса при определении пределов КК, что позволяет проводить более точную ДССП. Поэтому для мониторинга процесса передачи голосового трафика, характеризующегося временными рядами значений ACD и ASR , использование КК, построенных в соответствии с вероятностным подходом, является предпочтительным.

Исследованы наиболее распространённые карты одномерного статистического контроля процесса: карты Шухарта, карты кумулятивных сумм (КУСУМ) и карты экспоненциально взвешенных скользящих средних (ЭВСС). Несмотря на то, что эти карты предназначены для диагностики состояния стабильности только стационарных процессов, они лежат в основе большинства методик построения КК процессов со сложной структурой.

Использование карт многомерного статистического контроля целесообразно в случаях, когда контролируемые характеристики являются коррелированными. Одной из наиболее распространённых многомерных КК является карта Хотеллинга. Однако, так как корреляционная связь между значениями характеристик процесса передачи голосового трафика ACD и ASR отсутствует, в диссертационной работе рассматриваются только одномерные КК.

Исследованы и систематизированы основные подходы к построению КК стационарного процесса с асимметричным распределением значений характеристики. Выделены и подробно описаны две методики построения КК, в наибольшей степени удовлетворяющие критериям, важным для аналитика при диагностике состояния стабильности временного ряда значений ACD : наличие вычислительной робастности контрольных пределов; отсутствие нелинейных преобразований исходных данных; низкая вероятность совершения ошибок 1-го и 2-го рода при помощи КК. Однако эти методики не учитывают ранее выявленную теоретическую модель распределения значений ACD , что может привести к расчёту некорректных оценок контрольных пределов. В связи с этим актуальной задачей является разработка методики построения КК на основе ПБ-процедуры (учитывающей теоретическую модель распределения), полностью соответствующей критериям, важным для аналитика при диагностике состояния стабильности временного ряда значений ACD .

Исследованы основные подходы к построению КК автокоррелированных и нестационарных процессов. Выделены и подробно описаны две методики построения КК, позволяющие учесть циклическую структуру процесса. Однако данные методики не учитывают возможность сезонной вариации значений дисперсии и возможность неравного объёма выборки внутри подгрупп (характерные временным рядам значений ACD и ASR). В связи с этим актуальной задачей является разработка методики построения КК, позволяющей полностью учесть свойства временных рядов значений характеристик ACD и ASR .

Исследованы основные методики экономического планирования КК. В результате исследования литературы по СУП выявлено, что отсутствуют методики экономического планирования КК, применимые для циклостационарных процессов. В связи с этим актуальной

задачей является разработка методики экономического планирования КК для циклостационарных процессов, характеризующихся временными рядами значений ACD и ASR .

В третьей главе представлены разработанные автором диссертационной работы методики СУП передачи голосового трафика.

Разработана методика построения КК стационарного процесса с асимметричным распределением значений характеристики, основанная на ПБ - процедуре вычисления контрольных пределов. С помощью этой методики может быть построена КК любой статистики для любого теоретического закона распределения индивидуальных значений характеристики (X). Методика построения \bar{X} - карты представлена в соответствии со следующими шагами:

1. Принимается решение о теоретическом законе, описывающем распределение значений X текущего процесса (например, при помощи одного из критериев согласия).

2. Из текущего процесса отбираются $n \cdot k$ значений характеристики X_{ij} , где $i=1, \dots, k$ – номер подгруппы в выборке; $j=1, \dots, n$ – номер значения в подгруппе. Для каждой i -й подгруппы вычисляются следующие статистики: среднее подгруппы (\bar{X}_i), стандартное отклонение (S_i) и квадрат стандартного отклонения (S_i^2).

3. По k подгруппам рассчитываются статистики: общее среднее ($\bar{\bar{X}}$), среднее значение стандартного отклонения (\bar{S}), среднее значение квадрата стандартного отклонения (\bar{S}^2).

4. Для теоретического распределения с двумя параметрами, определённого на шаге 1, $M[X]$, $D[X]$ и параметры распределения (θ_1, θ_2) имеют аналитическую связь следующего вида:

$$\begin{cases} M[X] = g_1(\theta_1, \theta_2) \\ D[X] = g_2(\theta_1, \theta_2) \end{cases} \quad (3)$$

Статистики $\bar{\bar{X}}$ и \bar{S}^2 (или $(\bar{S})^2$) принимаются соответственно за $M[X]$ и $D[X]$, и рассчитываются оценки параметров теоретического распределения ($\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2$). На этапе предварительного исследования процесса (в фазе I) целесообразно использовать статистику $(\bar{S})^2$, так как она более робастна к присутствию особых причин вариабельности значений X , чем \bar{S}^2 . В отличие от $(\bar{S})^2$, статистика \bar{S}^2 является несмещённой оценкой дисперсии, поэтому на этапе мониторинга процесса (в фазе II) использование \bar{S}^2 является более целесообразным.

Для логарифмически нормального закона $LogN(\mu; \sigma^2)$, которым могут быть аппроксимированы распределения значений CD , аналитическая связь между $\bar{\bar{X}}$, \bar{S}^2 и ($\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2$) представлена в следующем виде (в фазе II):

$$\begin{cases} \hat{\mu} = \ln(\bar{\bar{X}}) - \frac{\hat{\sigma}^2}{2} \\ \hat{\sigma} = \sqrt{\ln\left(\frac{\bar{S}^2}{e^{2 \cdot \ln(\bar{\bar{X}})}} + 1\right)} \end{cases} \quad (4)$$

5. С помощью одного из методов генерирования псевдослучайных чисел формируется выборка объёма N , значения которой X_{ij}^* образуются в соответствии с плотностью теоретического распределения $f_x(\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2)$.

6. Полученная выборка разбивается на $B = N/n$ подгрупп, и для каждой подгруппы объёма n рассчитывается значение статистики \bar{X}_i^* (по аналогии с вычислением \bar{X}_i).

7. В порядке возрастания ранжируются B значений \bar{X}_i^* . Нижним пределом $LCL_{\bar{X}}$ является значение с порядковым номером $(\alpha/2) \cdot B$. Верхним пределом $UCL_{\bar{X}}$ является значение с порядковым номером $[1 - (\alpha/2)] \cdot B$.

Разработанная методика построения КК может быть использована в случаях неравного объёма выборки внутри подгрупп. Для вычисления оценок $M[X]$ и $D[X]$ на шаге 3 можно воспользоваться следующими формулами:

$$\bar{\bar{X}} = \frac{\sum_{i=1}^k (n_i \cdot \bar{X}_i)}{\sum_{i=1}^k n_i}; \quad (5)$$

$$\bar{S}^2 = \frac{\sum_{i=1}^k [(n_i - 1) \cdot S_i^2]}{\sum_{i=1}^k (n_i - 1)}. \quad (6)$$

где n_i – объём выборки внутри отдельной (i -й) подгруппы.

Тогда на шагах 6 – 7 вместо n рассматривается n_i , и пределы \bar{X} - карты рассчитываются отдельно для каждой из подгрупп (объёма n_i).

Особенность разработанной методики построения КК заключается в использовании средних из k статистик положения и изменчивости для формирования теоретической модели распределения значений X (при помощи аналитической связи между $M[X]$, $D[X]$ и $(\theta_1, \dots, \theta_m)$ теоретического распределения значений X), в отличие от использования оценок параметров распределения, рассчитанных по $n \cdot k$ значениям X_{ij} (применяемых в существующих методиках построения КК на основе ПБ-процедуры). Использование среднего статистик внутригрупповой изменчивости в разработанной методике позволяет рассчитывать корректные оценки контрольных пределов даже на основе частично неоднородных данных. Поэтому, в отличие от альтернативных методик на основе ПБ-процедуры, разработанная методика может использоваться не только в фазе II, но и в фазе I. При этом в методике отсутствует необходимость в нелинейных преобразованиях исходных значений X (для перехода к другой характеристике), усложняющих интерпретацию и применение на практике результатов анализа.

Разработана методика построения КК циклостационарного процесса, учитывающая возможность сезонной вариации значений дисперсии и неравный объём выборки внутри подгрупп. Она может быть представлена в соответствии со следующими шагами:

1. Происходит оценка периодической структуры процесса для идентификации циклов.
2. Отбираются точки, расположенные относительно друг друга на расстояниях $w \times \varphi$ (где w – любое целое число, φ – количество точек внутри одного периода T), в которых процесс стационарен. По этим точкам рассчитываются контрольные пределы карты стационарного процесса (в соответствии с выбранной методикой построения КК стационарного процесса).
3. Рассчитанные контрольные пределы (вместе с точками, для которых они были рассчитаны) переносятся на график циклостационарного процесса.
4. Шаги 2 и 3 повторяются для всех остальных точек циклостационарного процесса. В результате для каждой точки найдены контрольные пределы.
5. В соответствии с критериями серий (правилами, предложенными Л. Нельсоном, «зональными критериями Western Electric» или др.) происходит диагностика состояния

стабильности циклостационарного процесса. Данные правила позволяют оценить состояние стабильности как стационарного, так и циклостационарного процесса.

Главным достоинством разработанной методики является возможность использования в ней практически любой КК стационарного процесса (в том числе КК, построенной при помощи ПБ-процедуры), что позволяет применять разработанную методику для диагностики состояния стабильности циклостационарных процессов с асимметричным распределением данных.

Разработана методика экономического планирования КК процесса со сложной структурой данных (в том числе циклостационарного процесса), в которой используются современные возможности хранения и анализа большого объёма информации. В её основе лежит стоимостная модель потерь, предложенная в работе Джианг и Цуи. Формула этой модели модифицирована с целью вычисления значения суммарных потерь от ошибок 1-го и 2-го рода на основе данных из ранее анализированных практических ситуаций:

$$L_{\Sigma} = L_{in} + L_{out} = N_{\alpha} \cdot C_D + \sum_{l=1}^{\infty} [N_{(1-\beta)l} \cdot A_l + C_D + C_A], \quad (7)$$

где L_{Σ} – суммарные потери от ошибок (у.е.); L_{in} – потери от ошибок 1-го рода (у.е.); L_{out} – потери от ошибок 2-го рода (у.е.); N_{α} – количество случаев совершения ошибки 1-го рода (шт.); $N_{(1-\beta)l}$ – дина серии (количество точек) до идентификации нестабильного состояния процесса для l -го случая (шт.); A_l – потери из-за нестабильного состояния процесса (для одной точки) для l -го случая (у.е.); C_D – стоимость диагностики (работниками организации) одного случая (у.е.); C_A – стоимость корректирующего действия (у.е.).

Исходные условия применения разработанной методики (для определения оптимальных параметров плана контроля процесса): используются данные о реальных процессах, которые представлены в виде временных рядов некоторой характеристики; группа экспертов на основе отраслевой практики формирует согласованное мнение об аномальном поведении каждого временного ряда: в реализации дифференцируются точки стабильного состояния процесса от нестабильного; для этих временных рядов уже установлены, обусловленные практическими ситуациями, периодичность взятия выборок и объемы выборок в подгруппах.

Методика экономического планирования КК может быть представлена в соответствии со следующими шагами:

1. Устанавливаются некоторые значения параметров плана контроля: методика построения КК, правила идентификации нестабильного состояния процесса.
2. Каждый из временных рядов разбивается на две части. Первая часть временного ряда используется в фазе I, а вторая часть – в фазе II.
3. В соответствии с выбранной методикой построения КК рассчитываются контрольные пределы для первых частей временных рядов (в фазе I).
4. Проводится ДССП (в фазе I).
5. Происходит идентификация ошибок 1-го и 2-го рода (в фазе I).
6. Из временных рядов удаляются точки (значения), в которых идентифицировано нестабильное состояние процесса.
7. Происходит пересчёт контрольных пределов на основе значений «очищенных» временных рядов.
8. К «очищенным» первым частям временных рядов добавляются вторые части. Для вторых частей временных рядов используются контрольные пределы, рассчитанные на шаге 7.

9. Шаги 4 – 5 повторяются в фазе II.

10. Вычисляются значения N_α и $N_{(1-\beta)l}$ (для каждого l -го случая нестабильного состояния процесса); группой экспертов задаются значения A_l , C_D , C_A . Полученные величины подставляются в формулу (7) для вычисления L_Σ в фазе II.

Таким образом, для заданных параметров КК вычислено значение стоимостной модели потерь L_Σ . Стоимостная модель является функцией параметров КК. Минимум этой функции можно определить при помощи одного из алгоритмов поиска (генетического алгоритма или др.).

11. Выбирается один из алгоритмов поиска. В соответствии с этим алгоритмом производится поиск минимального значения L_Σ (за счёт выполнения шагов 1 – 10). Найденному минимуму функции соответствуют оптимальные значения параметров плана контроля.

Предложена система методик СУП, которая полностью учитывает свойства временных рядов значений ACD и ASR при построении КК, а также позволяет подобрать оптимальные правила определения нестабильного состояния временного ряда значений характеристики. В методике построения КК циклостационарного процесса используются КК стационарного процесса, различные для характеристик ACD и ASR . Для построения КК стационарного временного ряда значений ACD применима разработанная методика на основе ПБ-процедуры. В результате образуется методика построения КК циклостационарного процесса на основе ПБ-процедуры. Для построения КК стационарного временного ряда значений ASR применима методика Ланея. В свою очередь, использование разработанной методики экономического планирования КК позволяет подобрать оптимальные правила определения нестабильного состояния временного ряда значений характеристики (ACD или ASR), что приводит к минимизации потерь от ошибок 1-го и 2-го рода при ДССП передачи голосового трафика.

В четвёртой главе исследовано качество ДССП разработанных методик построения КК.

Проведён сравнительный анализ качества ДССП методик построения КК стационарного процесса с асимметричным распределением значений характеристики. Как в случае посуточного, так и в случае почасового мониторинга временных рядов значений ACD и ASR , могут быть использованы КК стационарного процесса. В первом случае они используются напрямую (временные ряды стационарны), а во втором случае они используются в методике построения КК циклостационарного процесса для точек, расположенных относительно друг друга на расстояниях целого числа периодов, в которых процесс стационарен.

Как было отмечено ранее, при диагностике состояния стабильности временного ряда значений ACD аналитику важно, чтобы методика построения КК соответствовала следующим критериям: наличие вычислительной робастности контрольных пределов; отсутствие нелинейных преобразований исходных данных; низкая вероятность совершения ошибок 1-го и 2-го рода при помощи КК. В соответствии с первыми двумя вышеуказанными критериями были выбраны следующие методики построения \bar{X} - и S - карт: методика Шухарта, методика Кху, Атта и Чен, методика на основе кривых Джонсона (КД) и разработанная методика на основе ПБ-процедуры. Для определения оценок вероятностей совершения ошибок 1-го и 2-го рода (оценок α - и β -вероятностей соответственно) при помощи \bar{X} - и S - карт, построенных в соответствии с выбранными методиками, в фазе II проведено компьютерное моделирование по методу Монте-Карло. Данные, использованные в исследовании, получены генерированием выборок двух асимметричных теоретических распределений: логарифмически нормального распределения $LogN(\mu; \sigma^2)$ и распределения Вейбулла $W(\delta; \psi)$. Значения X , на основе которых вычислялись

контрольные пределы \bar{X} - и S - карт, характеризуют выборку стабильного процесса. При построении КК рассматривались средний ($n=10$) и большой ($n=20$) объёмы внутригрупповой выборки. Для карт, построенных по методикам Шухарта и Кху, Атта и Чен, в качестве контрольных пределов были приняты границы $\pm 3\sigma$, а для карт, построенных по методикам на основе КД и на основе ПБ-процедуры, – квантили $UCL_{99,865\%}$ и $LCL_{0,135\%}$. Для моделирования асимметричных распределений $LogN(\mu^*; \sigma^{2*})$ и $W(\delta^*; \psi^*)$, характеризующих нестабильное состояние процесса, используются формулы из метода взвешенных дисперсий.

В результате проведённого исследования на рис. 3, а представлены графические зависимости оценок $\alpha_{\bar{X}}$ -вероятности выхода за $LCL_{\bar{X}}$ \bar{X} -карты (для каждой из рассмотренных методик) от величины $P\Box$ (при $n=10$), где $P\Box$ – вероятность того, что $X \leq M[X]$. Из рис. 3, а видно, что для всех рассмотренных методик, за исключением методики на основе ПБ-процедуры, по мере увеличения асимметрии распределения значительно возрастает отклонение $\alpha_{\bar{X}}$ от требуемого значения. Таким образом, значение оценки $\alpha_{\bar{X}}$ \bar{X} -карты, построенной в соответствии с методикой на основе ПБ-процедуры, наиболее близко к требуемому 0,135%. Несмотря на то, что при $P\Box=0,72$ использование методик Шухарта и Кху, Атта и Чен приводит к отсутствию ошибок 1-го рода, данный факт сигнализирует о возможной неспособности этих методик вычисления $LCL_{\bar{X}}$ к идентификации нестабильного состояния процесса.

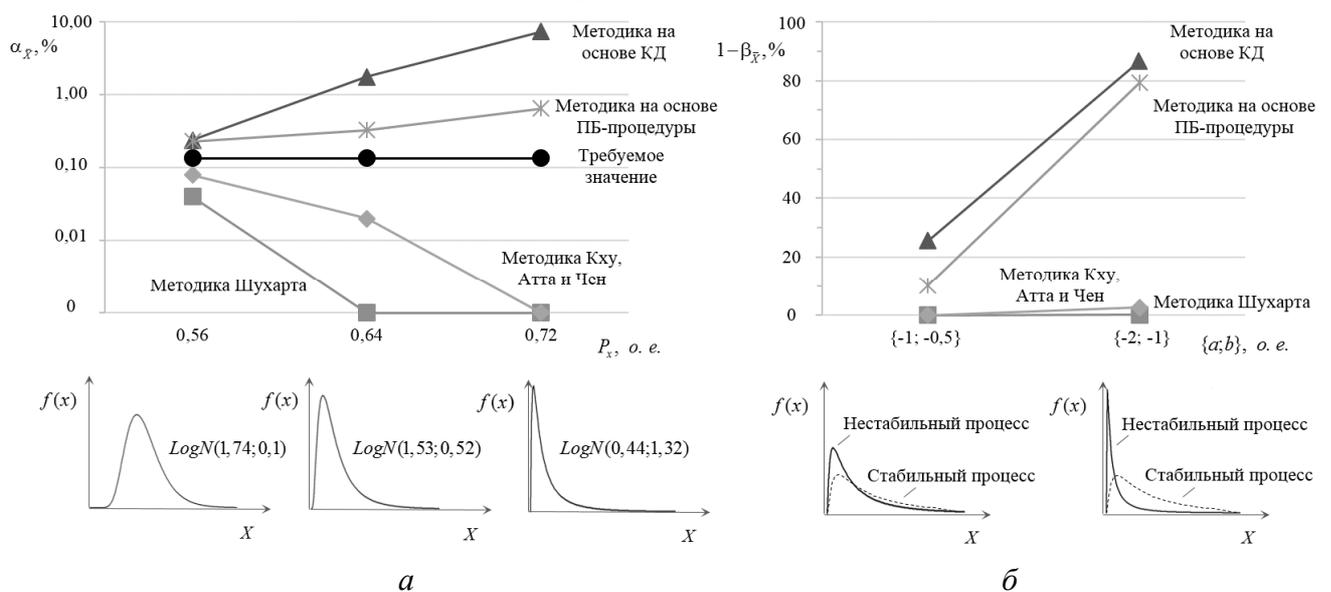


Рис. 3 – Графики оценок $\alpha_{\bar{X}}$ - и $(1-\beta_{\bar{X}})$ - вероятности выхода значения за $LCL_{\bar{X}}$ \bar{X} - карт

На рис. 3, б представлены графические зависимости оценок $(1-\beta_{\bar{X}})$ -вероятности выхода за $LCL_{\bar{X}}$ \bar{X} -карты (для каждой из рассмотренных методик) от значений параметров $\{a;b\}$ (для $n=10$), где a и b – параметры, характеризующие величины сдвига значений $M[X]$ и $SD[X]$ соответственно. В качестве модели распределения значений X стабильного процесса рассмотрено $LogN(0,44; 1,32)$ с $P\Box=0,72$. Моделями распределений нестабильного процесса являются $LogN(-0,12; 1,43)$ (при значениях параметров $\{-1; -0,5\}$) и $LogN(-1,41; 1,9)$ (при значениях параметров $\{-2; -1\}$). Представленные на рис. 3, б результаты также могут быть интерпретированы с помощью показателя средней длины серии до выхода точки за контрольный предел карты: $ARL_{\bar{X}} \approx 1/(1-\beta_{\bar{X}})$.

Например, при $1 - \beta_{\bar{X}} > 50\%$, \bar{X} -карта в среднем выявляет наличие особых причин вариабельности процесса ранее, чем на второй точке (чувствительность такой карты считается высокой). Как видно из рис. 3, б, \bar{X} -карта, построенная в соответствии с методикой на основе ПБ-процедуры, способна практически сразу идентифицировать нестабильное состояние процесса при сдвиге $\{-2; -1\}$. Однако \bar{X} -карты, построенные в соответствии с методиками Шухарта и Кху, Атта и Чен, неспособны идентифицировать нестабильное состояние процесса при аналогичном сдвиге в положении и изменчивости значений характеристики процесса.

В связи с вышесказанным в методике построения КК циклостационарного процесса (для почасового мониторинга временного ряда значений ACD) наиболее целесообразно использовать карту стационарного процесса, построенную по методике на основе ПБ-процедуры.

На основе реальных (почасовых) данных о процессе передачи голосового трафика, характеризующегося временным рядом значений ACD , проведён сравнительный анализ качества ДССП методик построения КК. Этот анализ проведён при помощи разработанной методики экономического планирования КК процесса со сложной структурой. При помощи автоматизированной системы сбора данных для выбранного телекоммуникационного направления передачи голосового трафика сформирован временной ряд значений ACD (\bar{X}_i) с переменным объёмом выборки n_i внутри подгрупп. Случаи ухудшения качества связи (нестабильного состояния процесса) сопровождались снижением значений ACD .

Процесс продолжал находиться в нестабильном состоянии до тех пор, пока оператор-клиент не высылал trouble ticket транзитному оператору, после чего происходила ДССП, и предпринимались корректирующие действия по его стабилизации. Группа экспертов на основе отраслевой практики сформировала согласованное мнение об аномальном поведении образованного временного ряда значений ACD : в результате произошла дифференциация точек стабильного состояния процесса от нестабильного. Выбраны следующие методики построения КК: методика Алвана и Робертса, методика Мюнза и Карла, методика Брутлага и разработанная методика построения КК циклостационарного процесса на основе ПБ-процедуры. Во всех методиках использовались следующие правила идентификации нестабильного состояния процесса:

- правило 1: выход точки за контрольный предел $UCL_{99,87\%}$ или $LCL_{0,13\%}$ (для методики на основе ПБ-процедуры) или за один из контрольных пределов при $\delta_{hw} = \delta = 3$ (для методик Алвана и Робертса, Мюнза и Карла, Брутлага) указывает на нестабильное состояние процесса;

- правило 2: выход двух последовательных точек, лежащих по одну сторону от CL (или от прогнозной линии модели), за предел $UCL_{97,72\%}$ или $LCL_{2,28\%}$ или за один из пределов при $\delta_{hw} = \delta = 2$ указывает на нестабильное состояние процесса;

- правило 3: выход трёх последовательных точек, лежащих по одну сторону от CL , за предел $UCL_{84,13\%}$ или $LCL_{15,87\%}$ или за один из пределов при $\delta_{hw} = \delta = 1$, две из которых (точек) выходят за предел $UCL_{97,72\%}$ или $LCL_{2,28\%}$ или за один из пределов при $\delta_{hw} = \delta = 2$ указывает на нестабильное состояние процесса.

Для сравнения качества ДССП выбранных методик построения КК выполнены шаги 1 – 11 разработанной методики экономического планирования КК процесса со сложной структурой. Результаты анализа качества ДССП в фазе I представлены в табл. 1. Из неё видно, что КК,

построенные по методике Алвана и Робертса и методике Мюнза и Карла, не идентифицировали корректно ни одной точки нестабильного процесса и при этом совершили достаточно большое число ошибок 1-го рода.

Таблица 1 – Результаты анализа качества ДССП в фазе I

Методика построения КК	Количество точек с ошибками 1-го рода, шт.	Количество точек с ошибками 2-го рода, шт.
Методика Алвана и Робертса	28 (из 345)	14 (из 14)
Методика Мюнза и Карла	11 (из 346)	14 (из 14)
Методика Брутлага	54 (из 298)	6 (из 14)
Методика на основе ПБ-процедуры	8 (из 346)	0 (из 14)

Методика Брутлага и методика построения КК циклостационарного процесса на основе ПБ-процедуры были выбраны для сравнительного анализа качества ДССП в фазе II. В правилах идентификации нестабильного состояния процесса рассматривались только нижние контрольные пределы. Для КК, построенных по выбранным методикам были вычислены значения N_α и $N_{(1-\beta)l}$ (для каждого l -го случая нестабильного состояния процесса). Группой экспертов были заданы следующие значения констант: $A_l = 1$ у.е., $C_D = 0,5$ у.е., $C_A = 0,1$ у.е. В случаях, когда жалоба клиента приходила до того, как КК выявляла нестабильное состояние процесса, значение потерь $N_{(1-\beta)l} \cdot A_l$ принималось равным 10 у.е. Полученные величины были подставлены в формулу (7) для вычисления L_Σ в фазе II. Результаты анализа качества ДССП в фазе II представлены в табл. 2. Из неё видно, что потери от совершения ошибок 1-го и 2-го рода КК, построенной по методике на основе ПБ - процедуры, почти в два раза меньше потерь от совершения ошибок КК, построенной по методике Брутлага.

Таблица 2 – Результаты анализа качества ДССП в фазе II

Методика построения КК	L_{in} , у.е.	L_{out} , у.е.	L_Σ , у.е.
Методика Брутлага	1	41,6	42,6
Методика на основе ПБ - процедуры	2	20,6	22,6

Для оценки экономических результатов использования разработанной методики построения КК циклостационарного процесса на телекоммуникационном предприятии в течение года, результаты анализа качества ДССП из табл. 2 были масштабированы с учётом 500 аналогичных телекоммуникационных направлений и 365 суток. При этом значение 1 у.е. было принято за 50 руб. Оценка экономических результатов представлена в табл. 3.

Таблица 3 – Оценка экономических результатов использования методик за год

Методика построения КК	$L_{год}$, руб.
Методика Брутлага	25 915 000
Методика на основе ПБ - процедуры	13 748 333
Экономия от использования методики на основе ПБ - процедуры	12 166 667

Таким образом, внедрение разработанной методики построения КК циклостационарного процесса вместо методики Брутлага позволяет крупному транзитному оператору голосовой связи сократить потери от совершения ошибок 1-го и 2-го рода на 12 166 667 руб. в год.

Для КК циклостационарного процесса, построенной по методике на основе ПБ-процедуры, произведён поиск оптимального набора правил идентификации нестабильного состояния процесса. Результаты поиска оптимального набора правил в фазе II для КК, построенной по методике на основе ПБ - процедуры, представлены в табл. 4. Исходя из значений L_Σ , наборы правил «1 и 2», «1 и 3» и «1, 2 и 3» являются оптимальными.

Таблица 4 – Результаты поиска оптимального набора правил в фазе II для методики построения КК циклоstationарного процесса на основе ПБ-процедуры

Правила идентификации нестабильного состояния процесса	L_{in} , у.е.	L_{out} , у.е.	L_{Σ} , у.е.
Правило 1	1	22,6	23,6
Правило 2	1	32,6	33,6
Правило 3	0	41,6	41,6
Правила 1 и 2	2	20,6	22,6
Правила 1 и 3	1	21,6	22,6
Правило 2 и 3	1	32,6	33,6
Правила 1, 2 и 3	2	20,6	22,6

В заключении перечислены основные результаты диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Благодаря предложенным и разработанным в диссертационной работе моделям и методикам СУП улучшено качество ДССП передачи голосового трафика. В работе получены следующие научные результаты:

1. Разработана модель процесса передачи голосового трафика, характеризующегося временными рядами значений ACD и ASR . Исследованы и систематизированы существующие методики СУП применительно к передаче голосового трафика, а также выявлены их недостатки. Доказана необходимость разработки методики СУП передачи голосового трафика, полностью учитывающей свойства временных рядов значений ACD и ASR .

2. Разработаны следующие методики СУП: методика построения КК стационарного процесса с асимметричным распределением значений характеристики, основанная на ПБ-процедуре; методика построения КК циклоstationарного процесса; методика экономического планирования КК процесса со сложной структурой. На основе разработанных методик предложена система методик СУП, которая полностью учитывает свойства временных рядов значений ACD и ASR при построении КК, а также позволяет подобрать оптимальные правила определения нестабильного состояния временного ряда значений характеристики.

3. Проведён сравнительный анализ качества ДССП методик построения КК на примере процесса передачи голосового трафика (на основе симулированных и реальных данных временного ряда значений ACD). В результате анализа выявлено, что качество ДССП разработанной методики построения КК циклоstationарного процесса на основе ПБ-процедуры в 2 раза (и более) превосходит качество ДССП альтернативных методик, что эквивалентно двукратному сокращению потерь в финансовом выражении.

4. При помощи системы разработанных методик СУП определены оптимальные параметры плана контроля процесса передачи голосового трафика, характеризующегося временным рядом значений ACD . Это позволило минимизировать потери от совершения ошибок 1-го и 2-го рода при принятии решения о состоянии стабильности процесса.

Разработанные в диссертационной работе методики СУП также могут быть использованы для ДССП из других отраслей. Результаты исследований, выполненных в диссертационной работе, вошли в основу системы мониторинга телекоммуникационных показателей качества, разработанной на предприятии ООО «Телесофт». Её внедрение на телекоммуникационных предприятиях Lanck Telecom Ltd. и ООО «Смарт Телеком» позволило этим предприятиям увеличить результативность выявления проблем с качеством трафика и уменьшить потери, связанные проверкой качества связи, что подтверждено соответствующими документами.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Лукин В. Н., Ященко В. В. Оценка стабильности циклических процессов с использованием контрольных карт Шухарта // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2013. № 5. С. 116-122.
2. Лукин В. Н., Ященко В. В. Вычисление контрольных пределов \bar{X} - карты на основе генерирования псевдослучайных чисел // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2014. № 4. С. 86-92.
3. Лукин В. Н. Параметрический бутстреп - метод диагностики состояния стабильности циклостационарного процесса с асимметричным распределением данных // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2015. № 3. С. 78-85.
4. Лукин В. Н., Ященко В. В. Параметрический бутстреп - метод вычисления контрольных пределов карт для асимметрично распределённых данных // Информационно-управляющие системы. 2015. № 2. С. 98-106.
5. Лукин В. Н. Сравнительный анализ качества диагностики состояния стабильности циклостационарного процесса методов построения контрольных карт // Качество. Инновации. Образование. 2015. №5. С. 38-46.

В сборниках трудов конференций:

6. Lukin V., Yaschenko V. Computation of Control Limits of \bar{X} - Chart Based on Pseudorandom Numbers Generation // Proc. of the IEEE Russia. NW Section. 2014. Vol. 6. P. 54-58.
7. Lukin V., Yaschenko V. A Parametric Bootstrap Method of Computation of Control Limits of Charts for Skewed Distributions // Proc. of the 2015 IEEE ElConRusNW. 2015. P. 90-95.
8. Лукин В. Н. Вычисление контрольных пределов \bar{X} - карты на основе генерирования псевдослучайных чисел // Управление качеством: сб. науч. тр. / XIII Международная научно-практическая конференция – М.: Изд-во ФГБОУ ВПО «МАТИ». 2014. С. 180-182.
9. Лукин В. Н., Ященко В. В. Сравнение чувствительности контрольных карт для асимметрично распределённых данных // Современные проблемы менеджмента: сб. науч. тр. / Материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2014. С. 19-23.
10. Лукин В. Н. Обзор параметрических методов построения контрольных карт для асимметрично распределённых данных // Актуальные аспекты модернизации российской экономики: сб. науч. тр. / I Всероссийская заочная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2015. С. 68-71.
11. Лукин В. Н. Экономические аспекты статистического управления процессами // Менеджмент качества и сертификация: сб. науч. тр. / 68-я научно-техническая конференция ППС СПбГЭТУ – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2015. С. 239-243.
12. Лукин В. Н. Метод экономического планирования контрольных карт // Современные проблемы менеджмента: сб. науч. тр. / IX Всероссийская научно-практическая конференция – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2015. С. 234-239.