

На правах рукописи



Имильбаев Рамис Ринатович

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
ЗНАЧЕНИЙ КОНТРОЛИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ
ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ
ОБРАБОТКИ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ**

Специальность: 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка
информации (промышленность)

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Уфа – 2018

Работа выполнена на кафедре «Управление и сервис в технических системах» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Крымский Виктор Григорьевич

Официальные оппоненты: **Иващенко Антон Владимирович**,
доктор технических наук, доцент,
ФГАОУ ВО «Самарский национальный
исследовательский университет имени
академика С.П. Королева», профессор
кафедры информационных систем и технологий

Павлов Сергей Владимирович,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный
авиационный технический университет»,
профессор кафедры геоинформационных систем

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Челябинский государственный
университет», г. Челябинск

Защита состоится 5 июня 2018 г. в 10 часов на заседании диссертационного
совета Д 212.217.03, созданного на базе ФГБОУ ВО СамГТУ по адресу:
г. Самара, ул. Галактионовская, 141, 6 корпус, ауд. № 33.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Самарского
государственного технического университета по адресу: 443100, Россия,
г. Самара, ул. Первомайская, д. 18.

Отзывы на автореферат просим высылать в двух экземплярах, заверенных
печатью, по адресу: 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244,
Самарский государственный технический университет, Главный корпус,
учёному секретарю диссертационного совета Д 212.217.03;
тел. (846) 337-04-43, e-mail: zoteev-ve@mail.ru.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.217.03, доктор
технических наук



Зотеев В.Е.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Актуальность работы. Современный этап развития газовой отрасли России и, в том числе, газораспределительных сетей (ГС), представляющих собой сложные технические системы с большим числом компонентов (объектов сети), характеризуется активным использованием средств телеметрии и телемеханики для контроля параметров указанных объектов. Это, в свою очередь, позволяет существенно повысить безопасность процесса транспортировки газа до конечного потребителя и снизить затраты, связанные с техническим обслуживанием ГС. Данное направление деятельности, ориентированное на создание систем мониторинга объектов ГС и предупреждения связанных с ними потенциальных аварий и катастроф, предусмотрено статьей 33 Федерального Закона от 31.03.1999 г. № 69-ФЗ «О газоснабжении в Российской Федерации» (с изменениями на 01.07.2017 г.). На практике только при наличии всех своевременно полученных данных о состоянии ГС может быть обеспечена ее бесперебойная и безаварийная работа.

Вопросам контроля и диагностики ГС для принятия управленческих решений по поддержанию надежности их функционирования посвящены работы отечественных исследователей И.В. Влацкой, Г.А. Кузнецовой, Р.А. Кускильдина, Б.Р. Мастобаева, М.Я. Панова и др., а также зарубежных – Ф. Кардена, В. Раша, Э. Смита. Ряд фирм в России и за рубежом (НТО «Терси-КБ», компании «PROMTECH», «Турботрон», «Open Grid Europe GmbH» и др.) создает системы телеметрического контроля характеристик ГС на основе передовых технологий, в частности, GSM – мониторинга, и координирует их эксплуатацию.

Тем не менее, далеко не все задачи в рассматриваемой области можно считать полностью решенными. Сказанное, прежде всего, относится к совмещению функций контроля состояния объектов ГС с прогнозированием изменения этого состояния, что должно найти отражение во включении в состав СТК специализированных подсистем, формирующих прогноз. Указанный прогноз необходим как для оперативного реагирования на неблагоприятные тенденции в изменении значений параметров того или иного объекта или сети в целом (угроза возникновения нештатной ситуации), так и для планирования ожидаемых режимов функционирования ГС в относительно долгосрочной перспективе. Формируемые прогнозы должны быть достоверными, что требует наличия обоснованных и эффективных алгоритмов, реализуемых отмеченными выше подсистемами.

Особенности наблюдения за параметрами ГС показывают, что собираемые при этом данные для последующего прогнозирования наиболее целесообразно представлять в виде временных рядов (ВР). Получение прогнозов с использованием ВР относится к достаточно изученной проблематике, освещенной в чрезвычайно большом числе публикаций. Тем не менее, применимость известных моделей ВР к специфическим данным о значениях параметров объектов ГС имеет ряд ограничений. Проблема здесь состоит в том,

что при наличии хаотической компоненты ВР (что характерно для параметров ГС, испытывающих флуктуации по разным причинам – изменение количества пользователей, варьирование ими объемов потребления газа и т.д.) в традиционных подходах предлагается основываться на рассмотрении указанного ряда как реализации случайного процесса. Дальнейший анализ приводит к необходимости принятия множества не вполне обоснованных гипотез (об эргодичности, о видах законов распределения параметров в различные моменты времени, о стационарности и др.). Альтернативой может служить подход, предполагающий переход к оперированию исходными данными как интервальнозначными величинами с последующим построением модели в виде интервального временного ряда (ИВР). В такой ситуации информация о результатах контроля значений давления, температуры и иных параметров на входах и выходах объектов сети оказывается представленной последовательностями интервалов их изменения за фиксированные периоды времени (например, за каждый час наблюдений) с «привязкой» к соответствующим временным отметкам. Неопределенность, вызванная наличием хаотической компоненты ВР, в отмеченной постановке отражается возможностью параметра принимать любые значения в пределах интервала. ИВР исследованы в гораздо меньшей степени, чем традиционные ВР, и рассматриваются, в основном, в публикациях Х. Арройо, Ф. де Карвальо, А. Майи. Следует указать, что на сегодняшний день отсутствуют алгоритмы прогнозирования на базе ИВР с учетом важного в случае ГС фактора сезонности. Кроме того, нет прошедших апробацию подходов к гибридизации (комбинированию) таких моделей, выполненных в рамках различных теоретических построений (например, экспоненциального сглаживания и нейросетевых алгоритмов), не осуществлено сравнительное исследование эффективности применения тех или иных методов к обработке реальных данных.

В силу изложенных причин проблема разработки методов и алгоритмов прогнозирования значений контролируемых параметров ГС по результатам обработки телеметрической информации является актуальной.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является разработка методов и реализующих их алгоритмов прогнозирования значений контролируемых параметров ГС по результатам обработки телеметрической информации.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач:

1. Анализ процессов сбора и обработки телеметрической информации о состоянии газораспределительных сетей (ГС) как сложных технических систем с последующим формированием общего подхода к прогнозированию значений параметров этих сетей на базе указанной информации.

2. Построение моделей прогнозирования контролируемых параметров газораспределительных сетей с учетом неопределенности и существующих закономерностей их изменения (наличия фактора сезонности).
3. Разработка методов и реализующих их алгоритмов прогнозирования значений контролируемых параметров газораспределительных сетей на основе предложенных моделей, которые ориентированы на использование интервальных временных рядов с сезонностью, применительно к различным исходным теоретическим концепциям (экспоненциальному сглаживанию, нейросетевым подходам, их гибридизации).
4. Разработка архитектуры платформы и соответствующего программного обеспечения системы телеметрического контроля параметров ГС, включающей подсистемы прогнозирования, в основе функционирования которых лежат предложенные методы и алгоритмы.
5. Сравнительное исследование эффективности применения предложенных методов и алгоритмов, а также моделей прогнозирования к обработке реальных данных, полученных с помощью телеметрического контроля газораспределительных сетей.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования в диссертационной работе является система контроля параметров объектов газораспределительной сети. Предметом исследования являются модели, методы и алгоритмы прогнозирования изменения контролируемых параметров газораспределительной сети, исходная информация о которых представлена в виде интервальных временных рядов.

Методы исследования. При решении поставленных в диссертационной работе задач были использованы методы системного анализа, относящиеся к построению моделей влияния неопределенных факторов на оценки свойств системы, имитационного моделирования, вычислительные методы, методы проектирования программного и информационного обеспечения, технологии объектно-ориентированного программирования.

Достоверность результатов диссертационного исследования обеспечивается корректным применением методологии системного анализа, методов и алгоритмов прогнозирования свойств и моделирования систем в условиях неопределенности. Справедливость выводов относительно достоверности, работоспособности и эффективности предложенных моделей и методов прогнозирования подтверждена результатами исследования их применения к обработке реальных данных.

Научная новизна. В диссертации получены следующие основные результаты, отличающиеся научной новизной:

1. Формализована постановка задачи обработки телеметрической информации о параметрах газораспределительных сетей, представленной в форме интервальных временных рядов по значениям указанных параметров.
2. Сформированы новые модели прогнозирования значений контролируемых параметров ГС как сложной технической системы, отличающиеся

применением аппарата интервальных временных рядов для учета неопределенности этих значений и возможностью использования различных способов представления интервальнозначных данных в составе указанных рядов, включая их векторное представление.

3. Разработаны методы и реализующие их алгоритмы прогнозирования значений параметров газораспределительных сетей, отличающиеся тем, что указанное прогнозирование выполняется на основе анализа интервальных временных рядов с учетом фактора сезонности. Расширен класс указанных методов за счет модификации на случай таких моделей ряда теоретических концепций (экспоненциального сглаживания и нейросетевых подходов, в том числе – сетей долгой краткосрочной памяти). Предложены пути их комбинирования (гибридизации) для получения наиболее быстрых и точных прогнозов.
4. Разработаны архитектура соответствующей платформы и программная реализация алгоритмов для подсистемы прогнозирования, включенной в состав системы телеметрического контроля объектов газораспределительной сети, что позволяет своевременно зафиксировать опасные тенденции изменения значений контролируемых параметров.
5. Впервые выполнено сравнительное исследование эффективности применения предложенных моделей, методов и алгоритмов прогнозирования к обработке реальных данных, собранных в автоматическом режиме с помощью системы телеметрического контроля газораспределительной сети. Результаты исследования позволили реализовать системный подход к формированию прогноза на базе выбора предпочтительных вариантов его получения для различных ситуаций и требований к его последующему использованию с целью поддержки управленческих решений.

Практическая значимость. Практическая ценность разработанных методов и реализующей их системы определяется тем, что они позволяют предоставить пользователю актуальную и достоверную информацию, необходимую для принятия обоснованных управленческих решений по осуществлению превентивных мер реагирования на угрозы возникновения аварийных ситуаций, от которых зависят безопасность и надежность эксплуатации объектов газораспределительных сетей. Указанную практическую ценность составляют:

- 1) предложенные модели, методы и реализующие их алгоритмы прогнозирования изменений контролируемых параметров ГС на базе интервальных временных рядов с учетом важного для рассматриваемых объектов фактора сезонности;
- 2) разработанное программное обеспечение подсистем прогнозирования в составе систем контроля состояния ГС, позволяющее получать обоснованные прогнозы в условиях наличия неопределенности;

3) результаты исследования применения различных предложенных подходов и алгоритмов к обработке реальных данных контроля ГС, дающие возможность на практике выбирать наиболее предпочтительный метод прогнозирования для той или иной конкретной ситуации.

Положения, выносимые на защиту:

1. Модели прогнозирования значений контролируемых параметров газораспределительной сети в условиях неопределённости.
2. Методы и реализующие их алгоритмы прогнозирования значений контролируемых параметров газораспределительной сети на базе предложенных моделей, ориентированных на использование интервальных временных рядов с учетом фактора сезонности.
3. Архитектура платформы и соответствующее программное обеспечение системы телеметрического контроля состояния ГС, включающей подсистемы прогнозирования, в основе функционирования которых лежат предложенные методы и алгоритмы.
4. Результаты сравнительного исследования эффективности применения предложенных моделей и методов к обработке реальных данных, полученных с помощью телеметрического контроля ГС.

Реализация результатов работы. Результаты диссертационной работы были использованы в процессе выполнения договоров о НИР между ФГБОУ ВО «Уфимский государственный университет экономики и сервиса» и ООО «УфаСистемаГаз» №01/021 от 22.01.2015 г. и №01/021 от 15.02.2016 г., а также договора о НИР между ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» и ООО «УфаСистемаГаз» № 11810-17 от 01.09.2017 г., что позволило создать эффективные подсистемы прогнозирования в составе автоматизированных комплексов телеметрического контроля ГС, функционирующих в разных районах Республики Башкортостан. В настоящее время результаты диссертации внедрены в ПАО «Газпром газораспределение Уфа» и ООО «УфаСистемаГаз», где используются в процессе совершенствования систем телеметрического контроля газораспределительных сетей с целью прогнозирования их состояния. Акты внедрения представлены в приложениях к диссертации.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на Всероссийской молодежной научно-технической конференции «Мавлютовские чтения» (Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа, 2012 г.), а также на XII, XIII, XIV Международных научно-практических конференциях «Экологическая безопасность регионов России и риск от техногенных аварий и катастроф» (Приволжский дом знаний, г. Пенза, 2012 - 2015 г.г.).

Основные публикации. По результатам диссертационной работы опубликовано 13 печатных работ, в том числе - 6 статей в журналах, входящих в перечень ВАК, 6 публикаций в сборниках материалов конференций международного и российского уровня и других изданиях, 1 свидетельство о

государственной регистрации программы для ЭВМ. Полный список публикаций приведен в заключительной части автореферата и в списке литературы по диссертации.

Личный вклад соискателя. В большинстве работ, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежит основная роль в отношении решения поставленных задач, анализа результатов и формулирования выводов.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа включает введение, четыре главы, заключение, список литературы и приложение. Диссертация изложена на 152 страницах текста, включая 43 рисунка и 32 таблицы. Количество библиографических ссылок – 99.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы. Дается характеристика предметной области исследования. Отмечаются научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Излагаются цели и задачи работы, основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен анализ процесса сбора и последующей обработки данных, которые получены в результате телеметрического контроля удаленных объектов газораспределительных сетей (ГС), представляющих собой сложные технические системы. Выявлены основные этапы, проблемы и особенности контроля значений параметров ГС.

Как показано на рис.1, основными объектами ГС являются пункты редуцирования газа (ПРГ), число которых достаточно велико: 40-50 в пределах одного района и до 500 в составе сетей на территории субъекта РФ. Газ поступает на ПРГ из сети пониженного по отношению к магистральному газопроводу давления, формируемого газораспределительной станцией (ГРС). В непрерывном режиме контролируются такие параметры, как значения давлений и температур газа на входах и выходах ПРГ, а также загазованность воздуха. Система телеметрического контроля (СТК) позволяет не только зафиксировать текущие данные о значениях контролируемых параметров сети, но и произвести их обработку с передачей на центральный сервер. Соответствующая информация предоставляется далее аварийно-диспетчерской службе (АДС). Изменение состояния сети может сопровождаться выходом значений контролируемых параметров за пределы, регламентируемые установленными величинами («уставками»), что требует принятия управленческих решений. На практике такие решения предусматривают направление обходчиков на проблемный участок сети.

Наибольшей действенности и своевременности реакций АДС на возникающие угрозы выхода контролируемых параметров ГС за установленные пределы можно добиться, если располагать прогнозами поведения этих параметров исходя из накопленной истории.

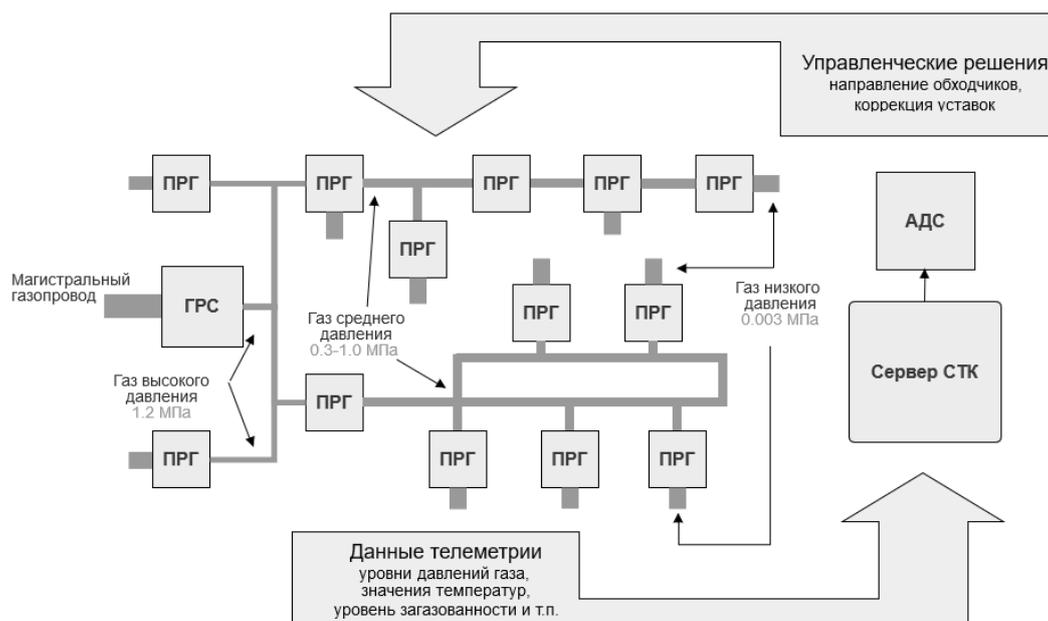


Рисунок 1- Схематическое представление процесса телеметрического контроля объектов ГС

Информация об истории изменений состоянии ГС может быть представлена в виде последовательности значений контролируемых параметров каждого удаленного объекта в моменты времени $t_1, t_2, \dots, t_j, \dots$, что делает целесообразным применение моделей на базе временных рядов (ВР). С учетом специфики поведения параметров объектов ГС следует принимать во внимание следующие основные компоненты ВР, влияющие на его уровень: тренд, сезонность и хаотическую составляющую. При этом важность рассмотрения фактора сезонности обусловлена периодическими колебаниями расхода газа потребителями в зависимости от времени суток (день – ночь). В свою очередь, наличие неопределенности (хаотической составляющей) в работе предлагается учитывать путем перехода от модели обычного ВР к модели интервального временного ряда (ИВР). Для получения ИВР с использованием данных контроля объектов сети формируются последовательности интервалов $[\underline{I}_j, \bar{I}_j]$, $j = 2, 3, \dots$, где $\underline{I}_j, \bar{I}_j$ - минимум и максимум значений наблюдаемого параметра за фиксированные периоды времени $t_2 - t_1, t_3 - t_2, \dots, t_j - t_{j-1}$; неопределенность в отмеченной постановке отражается возможностью параметра принимать любые значения в пределах интервала.

В главе выполнен подробный сравнительный анализ различных подходов к прогнозированию временных рядов, включая ИВР. Отмечается, что ИВР являются относительно новой и недостаточно исследованной модификацией моделей такого рода. На сегодняшний день существуют «интервальные» версии только небольшого числа алгоритмов прогнозирования (в частности, алгоритма экспоненциального сглаживания, но без учета сезонности - так называемого «метода Хольта»). Начаты исследования по прогнозированию для ИВР с

помощью нейросетевых технологий, но при этом ощущается недостаток в прошедших апробацию методиках построения гибридных моделей, в рамках которых нейросетевые алгоритмы могут комбинироваться с другими для получения более точного и быстрого прогноза. Наконец, пока не получены результаты сравнительного исследования эффективности применения тех или иных методов прогнозирования на базе ИВР к обработке реальных данных.

С учетом проведенного анализа, а также изучения условий функционирования объектов газораспределительной сети формулируются требования к разрабатываемым моделям и методам прогнозирования значений параметров ГС и излагаются задачи диссертационного исследования.

Вторая глава начинается с рассмотрения различных подходов к представлению информации об интервальных данных, включаемых в ИВР. Особое внимание уделяется векторному представлению, при котором каждый j -й элемент интервального временного ряда \mathbf{I} ($j = 1, 2, 3, \dots$) задается в виде вектора

$\mathbf{I}_j = \left\| \bar{I}_j, \underline{I}_j \right\|^T$, где $\underline{I}_j, \bar{I}_j$ - соответственно нижняя и верхняя границы интервала для указанного j -го элемента ряда, а T - символ транспонирования.

Этот подход предложен в работах ряда авторов (А. Майя, Ф. де Карвальо) и использован ими при разработке интервальной версии алгоритма двойного экспоненциального сглаживания для ИВР без учета сезонности - Holt^I . Однако в указанных работах не содержится обоснований его корректности. В диссертации показано, что применение данного подхода правомерно в случаях, когда реализованные на их основе алгоритмы не требуют выполнения операций умножения или деления интервальнозначных величин (случай алгоритма Holt^I). Выявлены ситуации, в которых результаты операций в рамках векторного представления интервалов совпадают с теми, которые могут быть получены по правилам стандартной интервальной арифметики или арифметики Маркова.

В связи с тем, что использование алгоритма Holt^I при прогнозировании значений параметров ГС обуславливает большие ошибки прогноза из-за отсутствия преобразований, учитывающих сезонную компоненту, в диссертации предложена интервальная версия модели тройного экспоненциального сглаживания - HoltWinters^I , которая свободна от указанного недостатка. Соответствующий алгоритм предполагает, как и Holt^I , векторное представление интервалов и характеризуется соотношениями

$$\tilde{\mathbf{I}}_{r+1} = \mathbf{L}_r^I + \mathbf{T}_r^I + \mathbf{S}_{r-q}^I,$$

$$\mathbf{L}_r^I = \mathbf{A}(\mathbf{I}_r - \mathbf{S}_{r-q}^I) + (\mathbf{E} - \mathbf{A})(\mathbf{L}_{r-1}^I + \mathbf{T}_{r-1}^I),$$

$$\mathbf{T}_r^I = \mathbf{B}(\mathbf{L}_r^I - \mathbf{L}_{r-1}^I) + (\mathbf{E} - \mathbf{B})\mathbf{T}_{r-1}^I,$$

$$\mathbf{S}_r^I = \mathbf{G}(\mathbf{I}_r - \mathbf{L}_{r-1}^I - \mathbf{T}_{r-1}^I) + (\mathbf{E} - \mathbf{G})\mathbf{S}_{r-q}^I,$$

где $\mathbf{I}_r^I = \left\| \bar{I}_r^I, \underline{I}_r^I \right\|^T$ - вектор, содержащий в качестве компонент нижнюю \underline{I}_r^I и верхнюю \bar{I}_r^I границы интервала значений контролируемого параметра на шаге r ,

$\tilde{\mathbf{I}}_{r+1}^I = \left\| \begin{matrix} \tilde{\bar{I}}_{r+1}^I \\ \tilde{\underline{I}}_{r+1}^I \end{matrix} \right\|^T$ - аналогичный вектор, который содержит нижнюю $\tilde{\underline{I}}_r^I$ и верхнюю $\tilde{\bar{I}}_r^I$ границы интервала, полученного по результатам прогноза для $(r+1)$ -го шага, $\mathbf{L}_r^I = \left\| \begin{matrix} \bar{L}_r \\ \underline{L}_r \end{matrix} \right\|^T$ - вектор интервальнозначного сглаженного уровня ИВР (\underline{L}_r и \bar{L}_r - нижняя и верхняя границы интервала уровня соответственно), $\mathbf{T}_r^I = \left\| \begin{matrix} \bar{T}_r \\ \underline{T}_r \end{matrix} \right\|^T$ - вектор, содержащий в качестве компонент значения нижней \underline{T}_r и верхней \bar{T}_r границ интервала сглаженного тренда к концу промежутка времени между $(r-1)$ -м и r -м отсчетами; $\mathbf{S}_{r-q}^I = \left\| \begin{matrix} \bar{S}_{r-q} \\ \underline{S}_{r-q} \end{matrix} \right\|^T$ - вектор сезонной составляющей за предыдущий сезон (периодичность сезонности задается величиной лага q); \underline{S}_{r-q} , \bar{S}_{r-q} - нижняя и верхняя граница интервала значений указанной сезонной составляющей; \mathbf{E} - единичная матрица размера (2×2) ; $\mathbf{A} = \|\alpha_{ij}\|$, $\mathbf{B} = \|\beta_{ij}\|$, $\mathbf{G} = \|\gamma_{ij}\|$ - двумерные матрицы коэффициентов сглаживания α_{ij} , β_{ij} , γ_{ij} , удовлетворяющих неравенствам $0 \leq \alpha_{ij}, \beta_{ij}, \gamma_{ij} \leq 1$, $i, j = 1, 2$, и определяемых исходя из условия

$$Q(\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{G}) = \sum_{j=3}^r (\mathbf{I}_j - \tilde{\mathbf{I}}_j)^T (\mathbf{I}_j - \tilde{\mathbf{I}}_j) \rightarrow \min.$$

Выбор начальных векторов в данной модели также предлагается «увязывать» со спецификой учета сезонности.

Так, в качестве начального вектора уровня берется средний уровень исходных данных за первый сезон: $\mathbf{L}_0^I = \frac{1}{q} \sum_{j=1}^q \mathbf{I}_j$, где \mathbf{I}_j - j -й вектор в составе исходного ИВР. Начальный вектор тренда формируется путем экстраполяции стартовой тенденции, но при этом - с учетом средних отклонений уровня за сезон: $\mathbf{T}_0^I = \frac{1}{q} \sum_{j=1}^q (\mathbf{I}_{j+q} - \mathbf{I}_j)$.

Задание совокупности начальных векторов сезонной составляющей производится в виде последовательности разностей между соответствующими векторами исходных значений контролируемого параметра за первый сезон и сформированным ранее начальным вектором уровня: $\mathbf{S}_i^I = \mathbf{I}_i - \mathbf{L}_0^I, i = 1, 2, \dots, q$.

В разработанной модели сохранены основные достоинства классических моделей прогнозирования на основе экспоненциального сглаживания (она обладает относительной простотой и обуславливает прозрачную реализацию отдельных этапов вычислительной процедуры, а также хорошую общую производительность расчетных программ). Прогнозы, получаемые с помощью предложенного алгоритма для параметров (давлений, температур газа) объектов ГС, показывают высокую точность в условиях наличия фактора сезонности, что

важно для последующего принятия обоснованных управленческих решений. Пример такого прогноза для выходного давления одного из РПГ показан на рис. 2, где выделенными линиями нанесены результаты вычислений с помощью алгоритма HoltWinters¹.

В третьей главе исследуются подходы к построению нелинейных моделей прогнозирования (НМП) для ИВР с сезонной составляющей. Следует указать, что в рамках НМП каждый элемент временного ряда рассматривается как нелинейная функция предыдущих элементов. Наиболее перспективными НМП являются нейросетевые и сформированные путем их комбинирования с алгоритмами на базе экспоненциального сглаживания гибридные модели прогнозирования.



Рисунок 2 - Пример прогноза для ИВР с сезонностью, полученный с помощью алгоритма HoltWinters¹

В первую очередь, в главе проанализирована возможность использования для прогнозирования изменений контролируемых параметров ГС нейросетевой модели MLP¹, основанной на многослойном персептроне и модифицированной применительно к обработке интервальных данных. Хотя подобный алгоритм рассматривался в некоторых известных публикациях, тем не менее, отсутствует опыт его применения в случае ИВР с сезонностью.

Модель была реализована с помощью соотношений

$$\mathbf{I}_r = \begin{bmatrix} \bar{I}_r^I \\ \underline{I}_r^I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_0^U + \sum_{j=1}^q \alpha_j^U \cdot g \left(\beta_{0j}^U + \sum_{i=1}^p (\beta_{ij}^U \bar{I}_{r-i}^I + \beta_{ij}^L \underline{I}_{r-i}^I) \right) \\ \alpha_0^L + \sum_{j=1}^q \alpha_j^L \cdot g \left(\beta_{0j}^L + \sum_{i=1}^p (\beta_{ij}^U \bar{I}_{r-i}^I + \beta_{ij}^L \underline{I}_{r-i}^I) \right) \end{bmatrix},$$

где верхняя \bar{I}_r^I и нижняя \underline{I}_r^I границы интервала на r -м шаге, входящие в виде компонент в вектор \mathbf{I}_r , определяются в рамках так называемого «оконного метода» по значениям границ интервалов на предыдущих p шагах (т.е. соответствующих компонент векторов $\mathbf{I}_{r-1}, \mathbf{I}_{r-2}, \dots, \mathbf{I}_{r-p}$).

Здесь α_0^U и α_0^L определяют веса отношений между входными нейронами и выходами, β_{0j}^U и β_{0j}^L характеризуют веса отношений между входными и скрытыми нейронами, а α_j^U , α_j^L , β_{ij}^U и β_{ij}^L - веса, ассоциируемые с каждым узлом

сети; p - количество входных нейронов (ширина окна); q - количество скрытых нейронов; g - нелинейная функция активации, используемая для перехода скрытого слоя.

Для обучения модели MLP^I применялся алгоритм «обратного распространения ошибки». При этом весовые коэффициенты рассчитывались путем минимизации среднеквадратичной ошибки методом градиентного спуска.

Модель MLP^I показала приемлемые с точки зрения точности результаты получения прогнозов для ИВР с сезонностью. Тем не менее, для расширения круга альтернатив, что важно в связи с варьированием типов исходных данных и условий прогноза, в диссертации была рассмотрена возможность построения НМП на основе рекуррентных нейронных сетей, которые показывают высокую эффективность в случае прогнозирования для обычных (неинтервальных) ВР.

В главе представлена впервые разработанная интервальная модификация LSTM^I модели прогнозирования на базе сети долгой краткосрочной памяти LSTM (long short-term memory), в которой по аналогии с моделью MLP^I применяется «оконный» метод. Пример структуры такой модели показан на рис. 3. На ее вход подается вектор

$$\mathbf{X}_t = \left\| \bar{I}_{t-1}, I_{t-1}, \bar{I}_{t-2}, I_{t-2}, \dots, \bar{I}_{t-p}, I_{t-p} \right\|^T,$$

состоящий из чередующихся значений верхних \bar{I}_j , $j = t-1, t-2, \dots, t-p$ и нижних I_j , $j = t-1, t-2, \dots, t-p$ границ интервалов в последовательные моменты времени в течение определенного периода. После прохождения данных через ячейки сети LSTM формируется выходной вектор \mathbf{Y}_t . Он содержит информацию о верхней \bar{I}_t и нижней I_t границах прогнозируемого интервала. В процессе исследования условий применения этой модели для прогнозирования состояния объектов ГС было установлено, что оптимальным является число ячеек сети LSTM, равное длине входного вектора. На вход модели, как и в случае с моделью MLP^I, подаются данные ИВР с шириной окна, равной периоду времени в одни сутки. Для обработки и прогнозирования применительно к длине $2p$ входного вектора используется входной слой с количеством нейронов, равным $2p$, слой с $q = 2p$ скрытыми ячейками сети LSTM и слой с двумя выходными нейронами, предназначенными для оперирования значениями \bar{I}_t и I_t соответственно.

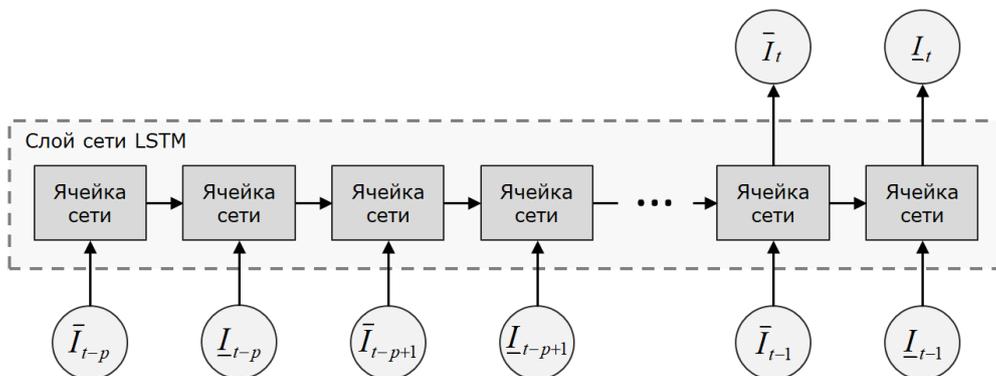


Рисунок 3 - Структура модели на основе сети LSTM для прогнозирования интервальных данных

Формальное описание данной модели можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned}\mathbf{f}_t &= \sigma_g(\mathbf{W}_f \mathbf{X}_t + \mathbf{U}_f \mathbf{Y}_{t-1} + \mathbf{b}_f), \\ \mathbf{i}_t &= \sigma_g(\mathbf{W}_i \mathbf{X}_t + \mathbf{U}_i \mathbf{Y}_{t-1} + \mathbf{b}_i), \\ \mathbf{o}_t &= \sigma_g(\mathbf{W}_o \mathbf{X}_t + \mathbf{U}_o \mathbf{Y}_{t-1} + \mathbf{b}_o), \\ \mathbf{c}_t &= \mathbf{f}_t \circ \mathbf{c}_{t-1} + \mathbf{i}_t \circ \sigma_c(\mathbf{W}_c \mathbf{X}_t + \mathbf{U}_c \mathbf{Y}_{t-1} + \mathbf{b}_c), \\ \mathbf{Y}_t &= \mathbf{o}_t \circ \sigma_h(\mathbf{c}_t),\end{aligned}$$

где \mathbf{c}_t - вектор состояния; \mathbf{W}, \mathbf{U} и \mathbf{b} с индексами, указывающими на их принадлежность к тому или иному уравнению, - матрицы и векторы настраиваемых параметров; $\mathbf{f}_t, \mathbf{i}_t, \mathbf{o}_t$ - векторы вентиляей (забывания, входных и выходных данных); $\sigma_c, \sigma_h, \sigma_g$ - функции активации; символ « \circ » - произведение Адамара.

Для обучения модели применяется метод обратного распространения с разворачиванием сети во времени (backpropagation through time, или ВРТТ), являющийся одной из модификаций метода градиентного спуска.

В целом, интервальная версия модели на основе сети LSTM также показала достаточно высокую точность в процессе обработки реальных данных, собранных при осуществлении телеметрического контроля ГС.

Дальнейшее изложение связано с разработкой гибридных алгоритмов прогнозирования, в которых обеспечивается согласованное функционирование двух моделей: одна из них ориентирована на линейную составляющую прогноза ВР (т.е. такую составляющую, которая представляет собой линейную комбинацию предыдущих элементов временного ряда), а вторая – на нелинейную. Для линейной части прогноза хорошо подходят такие модели, как различные варианты экспоненциального сглаживания, а для нелинейной – модели на базе нейросетей.

Процедура прогноза состоит в этом случае из следующих шагов.

Первоначально с помощью алгоритма на базе экспоненциального сглаживания формируется прогноз $\hat{\mathbf{I}}_r$ линейной составляющей \mathbf{I}_r интервального временного ряда, вычисляемой к временной отметке с номером r . Затем моделируется получение прогноза $\hat{\mathbf{e}}_r$ разности $\mathbf{e}_r = \mathbf{I}_r - \hat{\mathbf{I}}_r$ между соответствующим элементом ИВР и его линейной составляющей. Такое моделирование осуществляется с помощью нейросетевого алгоритма путем построения нелинейной зависимости $\hat{\mathbf{e}}_r$ от разностей в предыдущие моменты времени: $\hat{\mathbf{e}}_r = f(\mathbf{e}_{r-1}, \mathbf{e}_{r-2}, \dots, \mathbf{e}_{r-p})$. Окончательный результат прогнозирования находится как сумма $\hat{\mathbf{I}}_r = \hat{\mathbf{I}}_r + \hat{\mathbf{e}}_r$.

В диссертации исследованы возможности использования гибридных алгоритмов для обработки реальной телеметрической информации о параметрах объектов ГС для различных способов задания интервальных данных (в

частности, наряду с векторным представлением интервалов рассмотрены случаи их задания центральными точками и отклонениями от этих точек). На рис. 4 приведены примеры результатов такого исследования (контролируемые параметры – выходные давления ПРГ), которые показывают достаточно высокую точность совпадения прогнозов с фактическими интервалами значений параметра для соответствующих временных отметок.



Рисунок 4 - Прогнозы для выходных давлений ПРГ в составе ГС, полученные с помощью интервальных версий модели на базе многослойного перцептрона MLP^I, модели на основе сети долгой краткосрочной памяти LSTM^I и гибридной модели, построенной путем комбинирования алгоритмов HoltWinters^I и MLP^I

В четвертой главе с целью реализации предложенных подходов к прогнозированию состояния ГС на практике решается задача разработки архитектуры и соответствующего программного обеспечения СТК, содержащей подсистемы прогнозирования (ПП), в том числе - на основе интервальных временных рядов.

На рис. 5 представлены экраны пользовательского интерфейса разработанной СТК, с помощью которого можно получать информацию о текущем состоянии ГС, а также формировать прогнозы изменения этого состояния. Интерфейс содержит специальные управляющие формы, предусматривающие выбор требуемых алгоритмов прогнозирования, глубины прогноза и предпочтительного варианта визуализации полученных данных.

Важно отметить способность ПП функционировать в фоновом режиме и менять период отправки данных с удаленного объекта ГС на сервер телеметрии в зависимости от результатов прогноза, а при необходимости посылать пользователям сообщения об угрозах возникновения нештатных ситуаций.

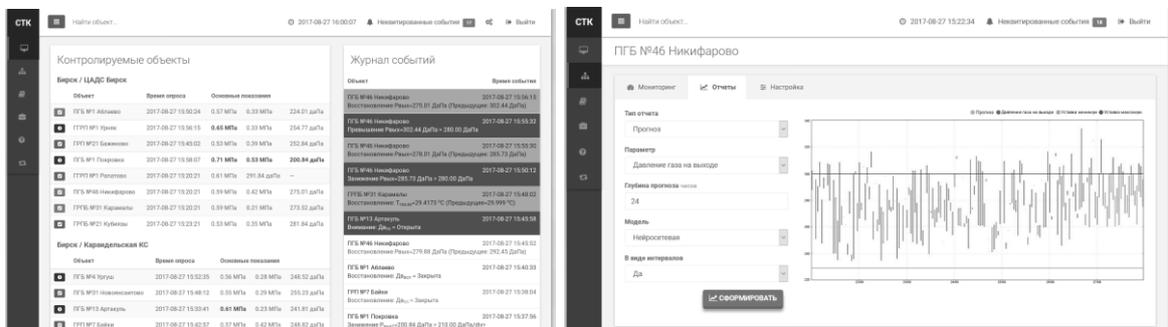


Рисунок 5 - Экраны пользовательского интерфейса СТК

Для практического выбора алгоритма прогнозирования, наиболее точно решающего поставленную задачу применительно к конкретным ситуациям в

процессе контроля объектов ГС, необходимо осуществить сравнительное исследование разных подходов на реальных данных. Такое исследование выполнено в диссертации и охватывает следующие типы моделей: нейросетевые на основе многослойного перцептрона (MLP^I), модели на базе сети долгосрочной краткосрочной памяти ($LSTM^I$), модели экспоненциального сглаживания с сезонной составляющей ($HoltWinters^I$) и гибридные модели. В свою очередь, в гибридных моделях осуществлено комбинирование нейросетевых алгоритмов с алгоритмами экспоненциального сглаживания для двух вариантов представления ИВР: в виде средних значений интервала и отклонений от среднего ($Hybrid$) и с применением описанного выше «векторного» представления интервалов ($Hybrid^I$).

Алгоритмы сравнивались с использованием следующих критериев эффективности:

- $MAPE^I$ – интервальная версия средней абсолютной ошибки в процентах, позволяет оценить среднюю абсолютную ошибку;
- MSE^I – среднеквадратичная мера ошибки, позволяет определить степень наличия «грубых» ошибок в прогнозах;
- ARV^I – средняя относительная дисперсия интервалов, позволяет оценить качество прогнозов относительно результатов прогнозирования по средним значениям обучающей выборки.

С целью определения наиболее эффективной модели в условиях многокритериальности выбора на базе указанных критериев предложено вычислять их свертку в виде комплексного нормированного показателя.

Исходная информация включала максимальные и минимальные значения выходного низкого давления газа 50-ти ПРГ за каждый час наблюдений в течение недели, полученные в процессе их телеметрического контроля. Указанные объекты расположены на различных участках ГС в городе Белебей (Республика Башкортостан), подведомственных ПАО «Газпром газораспределение Уфа». Данные из каждой выборки были предварительно разделены на две группы. Данные из первой группы (значения параметров за 6 суток) были использованы как обучающие и применялись для поиска коэффициентов моделей. Оставшиеся данные (показания за последние сутки) использовались в качестве контрольных для определения итоговых показателей точности. В связи с тем, что диспетчеру АДС необходима информация о тенденциях изменения параметров ГС на ближайшее время и на период его рабочей смены, прогнозы формировались на 3 (краткосрочные, или оперативные) и 24 (долгосрочные, или стратегические) часа вперед.

В результате исследования были определены значения комплексного показателя точности прогнозов, полученных с помощью исследуемых моделей, а также итоги ранжирования этих моделей по данному показателю (таблица 1).

Таблица 1. Итоги ранжирования моделей прогнозирования по комплексному показателю

Глубина прогноза	Место по итогам ранжирования				
	1	2	3	4	5
Краткосрочный прогноз	Hybrid (1,000)	HoltWinters ^I (0,870)	LSTM ^I (0,437)	MLP ^I (0,231)	Hybrid ^I (0,004)
Долгосрочный прогноз	HoltWinters ^I (0,963)	Hybrid (0,948)	LSTM ^I (0,481)	MLP ^I (0,181)	Hybrid ^I (0,105)

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что гибридная модель Hybrid, в которой применяется подход к анализу ИВР в виде средних значений интервала и отклонений от среднего, точнее других моделей формирует краткосрочные прогнозы. В то же время, интервальная модификация модели экспоненциального сглаживания HoltWinters^I наиболее эффективно формирует долгосрочные прогнозы. При этом следует отметить существенное превосходство в точности этих двух моделей прогнозирования по отношению к другим моделям (рис. 6).

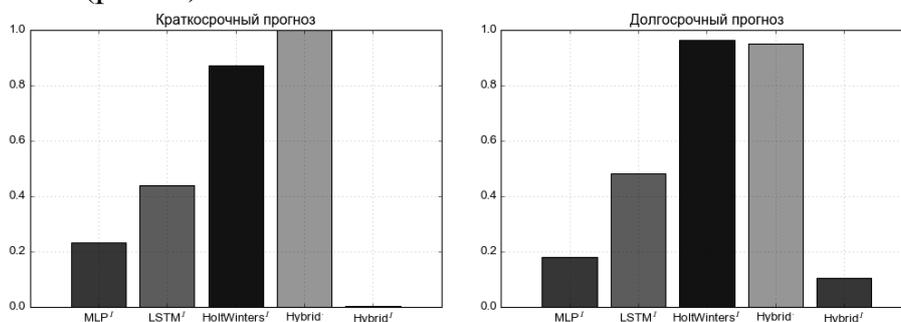


Рисунок 6 - Сравнение моделей по комплексному показателю

Проведенный анализ также показал, что выбор предпочтительного алгоритма прогнозирования зависит от степени проявления хаотической составляющей исследуемого временного ряда. С этой точки зрения исходные наборы данных делились на две категории:

- «детерминированные» данные с относительно небольшой хаотической составляющей и зашумленностью;
- «стохастические» данные, для которых роль хаотической составляющей достаточно велика.

На рис. 7 показаны графики изменения параметров, соответствующие случаям «детерминированных» данных с сезонной компонентой и «стохастических» данных без какой-либо выраженной структуры.

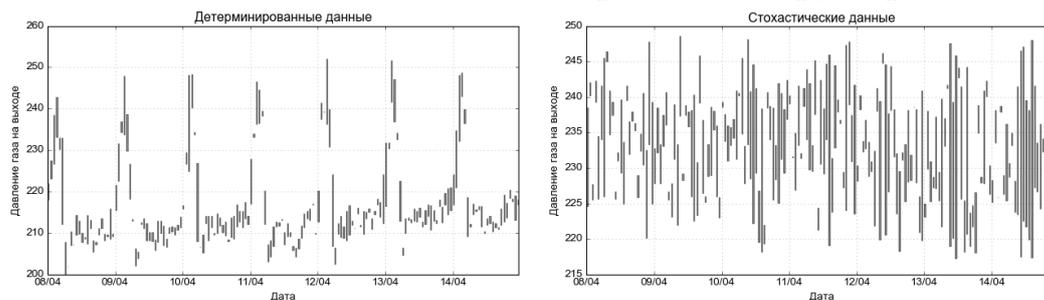


Рисунок 7 - Графики изменения контролируемого параметра ГС для случаев «детерминированных» и «стохастических» данных

Результаты сравнения точности моделей прогнозирования применительно к различным типам данных позволяют сделать выбор оптимальной модели с учетом требуемой глубины прогноза (таблица 2).

Таблица 2. Матрица выбора оптимальной модели прогнозирования

Глубина прогноза	Тип данных	Детерминированные	Стохастические
Краткосрочный		LSTM ^I	Hybrid
Долгосрочный		HoltWinters ^I	Hybrid

В итоге создается возможность подойти с обоснованных позиций к формированию модулей прогнозирования в составе СТК ГС.

В заключении представлены основные результаты диссертационной работы и сделан ряд выводов об их теоретической и практической ценности.

Основные результаты

Выполненное диссертационное исследование показало значимые перспективы использования нового класса моделей прогнозирования, основанного на формировании интервальных временных рядов, для превентивной оценки значений контролируемых параметров объектов газораспределительных сетей. С помощью предложенных алгоритмов можно создать условия для своевременного реагирования на угрозы возникновения нештатных ситуаций.

В диссертации получены следующие научные результаты:

1. С учетом выполненного исследования процессов сбора и обработки информации о контролируемых параметрах газораспределительных сетей (ГС) предложен общий подход к прогнозированию значений этих параметров, базирующийся на представлении накопленных данных в форме интервальных временных рядов и их последующем анализе.
2. Сформированы модели прогнозирования значений контролируемых параметров ГС с использованием аппарата интервальных временных рядов, которые позволяют принять во внимание наличие неопределенности и фактора сезонности.
3. Разработаны методы и реализующие их алгоритмы прогнозирования значений контролируемых параметров газораспределительных сетей в рамках применения сформированных моделей, ориентированных на использование интервальных временных рядов с сезонностью, применительно к различным исходным теоретическим концепциям (экспоненциальному сглаживанию, нейросетевым подходам, их гибридизации).
4. Разработаны архитектура платформы и необходимое программное обеспечение системы телеметрического контроля состояния ГС, включающей подсистемы прогнозирования, в основе функционирования которых лежат предложенные методы и алгоритмы.

5. Реализовано сравнительное исследование эффективности применения предложенных методов и алгоритмов к обработке реальных данных, полученных с помощью телеметрического контроля ГС.

Основные публикации по теме диссертации

В изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Крымский В.Г. Автоматизация управления технологическими процессами в газораспределительных сетях: проблемы, тенденции и перспективы [Текст] / В.Г. Крымский, И.М. Жалбеков, Р.Р. Имильбаев, А.Р. Юнусов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. - 2013. - Т.9.-№2. - С.70-79.
2. Крымский В.Г. Выбор периодичности обновления информации о состоянии газораспределительной сети при использовании системы телеметрии [Текст] / В.Г. Крымский, Ф.М. Ахмеджанов, Р.Р. Имильбаев, А.Р. Юнусов // Электротехнические и информационные комплексы и системы.- 2014. - Т.10.-№1. - С.78-85
3. Крымский В.Г. Прогнозирование состояния газораспределительной сети на основе данных телеметрии для предупреждения аварийных ситуаций [Текст] / В.Г. Крымский, Ф.М. Ахмеджанов, Р.Р. Имильбаев, А.Р. Юнусов // Электротехнические и информационные комплексы и системы.- 2015. - Т.11.- №2. –С.37-42.
4. Имильбаев Р.Р. Анализ эффективности применения алгоритмов прогнозирования в процессе контроля состояния газораспределительной сети [Текст] / Р.Р. Имильбаев // Электротехнические и информационные комплексы и системы. - 2016. - Т.12.-№1. - С.64-74.
5. Имильбаев Р.Р. Использование интервальных временных рядов для прогнозирования состояния газораспределительной сети [Текст] / Р.Р. Имильбаев, В.Г. Крымский, А.Р. Юнусов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. - 2016. - Т.12.-№4. - С.62-72.
6. Имильбаев Р.Р. Исследование эффективности применения моделей на базе интервальных временных рядов с сезонностью для прогнозирования состояния сложных технических объектов [электронный ресурс] // Инженерный вестник Дона. - 2017.- №4. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4388>

В других рецензируемых изданиях, сборниках научных статей, трудов и материалов конференций:

7. Имильбаев Р.Р. Обеспечение сбора и обработки информации в территориально распределенных системах. [Текст] // Всероссийская молодежная научная конференция «Мавлютовские чтения». -Т.3. -Уфа: УГАТУ.- 2012. - С. 52-54.
8. Имильбаев Р.Р. Современные подходы к построению систем сбора и обработки информации в газораспределительных сетях с целью контроля

их безопасности [Текст] / Р.Р. Имильбаев, В.Г. Крымский, А.Р. Юнусов, К.В. Балаба // Экологические проблемы современности: сборник статей XII международной научно-практической конференции. – Пенза: Приволжский Дом Знаний.- 2012. - С.37-39.

9. Имильбаев Р.Р. Использование сети интернет при построении систем мониторинга газораспределительных сетей [Текст] / Р.Р. Имильбаев, В.Г. Крымский, А.Р. Юнусов // Экологические проблемы современности: сборник статей XIII Международной научно-практической конференции. - Пенза: Приволжский Дом Знаний.2013. - С.28-30.
10. Имильбаев Р.Р. Алгоритм определения периода обновления данных телеметрии о состоянии газораспределительной сети [Текст] / Р.Р. Имильбаев, В.Г. Крымский, Ф.М. Ахмеджанов, А.Р. Юнусов // Экологические проблемы современности: сборник статей XIV международной научно-практической конференции. - Пенза: Приволжский Дом Знаний. - 2014. - С.14-16.
11. Имильбаев Р.Р. Прогнозирование нештатных ситуаций по результатам телеметрического контроля состояния шкафного газорегуляторного пункта [Текст] / Р.Р. Имильбаев, В.Г. Крымский, А.Р. Юнусов // Экологические проблемы современности: сборник статей XV международной научно-практической конференции. - Пенза: Приволжский Дом Знаний. - 2015. - С.56-59.
12. Крымский В.Г. Интервальные модели неопределенности в задачах прогнозирования состояния газораспределительных сетей [Текст] / В.Г. Крымский, Р.Р. Имильбаев, А.Р. Юнусов // Новая наука: опыт, традиции, инновации. – Стерлитамак: ООО «Агентство международных исследований». - №1 (1). - 2016. - С.27-29.

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ:

13. Имильбаев Р.Р. Система прогнозирования интервальных данных / Р.Р. Имильбаев. – Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017662379 от 07.11.2017 г. – М.: Роспатент.-2017.

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета Д 212.217.03
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»
(протокол № 3 от 29 марта 2018 г.)

Заказ № 156. Тираж 100 экз.

Отпечатано на ризографе.
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»
Отдел типографии и оперативной полиграфии
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244