



АЛЕКСЕЕВА Полина Геннадьевна

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ
И УПРАВЛЯЮЩАЯ СИСТЕМА ТЕРРИТОРИАЛЬНО РАСПРЕДЕЛЕННЫХ
ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ ОБЪЕКТОВ ГАЗОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Специальность: 2.2.11. Информационно-измерительные
и управляющие системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Тула – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тульский государственный университет»

Научный руководитель: **Панарин Владимир Михайлович,**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Портнов Евгений Михайлович,**
доктор технических наук, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский институт «Московский институт электронной техники», Институт системной и программной инженерии и информационных технологий, профессор

Кантюков Рафаэль Рафкатович,
кандидат технических наук, ООО «Газпром ВНИИ-ГАЗ» (г. Санкт-Петербург), заместитель Генерального директора по науке

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», г. Москва

Защита состоится «24» декабря 2024 г. в 12:00 час. на заседании диссертационного совета 24.2.417.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» по адресу: 300012, г. Тула, пр. Ленина, д. 92 (9-101).

Автореферат разослан «29» октября 2024 г.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» и на сайте: <https://tulsu.ru/science/dissertation/diss-24-2-417-03/alekseeva-pg-24-2-417-03>

Ученый секретарь
диссертационного совета



Маслова
Анна Александровна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Проведение масштабной цифровизации в России в различных сферах деятельности, особенно в производстве, подтверждает актуальность проводимых работ в газовой промышленности по развитию и совершенствованию информационно-измерительных и управляющих систем (ИИУС). Начиная с начала 2000 годов в газораспределительных организациях повсеместно стали внедряться системы телеметрии с установкой программного обеспечения на пультах диспетчерских служб с применением современных способов и методов обмена данными и передачи управляющих сигналов.

Развитие данных ИИУС, начиная с применения на станциях катодной защиты, продолжилось и распространилось на пункты редуцирования газа, крановые узлы и запорную арматуру и, как естественный процесс, объединилось в единую систему, позволяющую не только осуществлять контроль технологических параметров, но и заблаговременно предупреждать нештатные и аварийные ситуации на газовых сетях. Особенно это важно на сетях газораспределения, которые разветвлены по всей территории административных субъектов различного подчинения. Объекты сетей находятся на значительном расстоянии друг от друга, но в то же время они взаимосвязаны, как минимум в рамках газораспределительной станции (ГРС). Кроме того, значительное изменение параметров одного из объектов влечет за собой цепочку изменений на других объектах.

Данный фактор влияет на безопасность, бесперебойность газоснабжения потребителей. В связи с этим, совершенствование информационно-измерительной и управляющей системы с применением алгоритмов и моделей прогнозирования по истории данных, а также изменения технологического процесса транспортировки природного газа, является в настоящее время **актуальной** и даже первоочередной задачей.

С помощью ИИУС территориально распределенных объектов газораспределения накапливается большой объем данных телеметрии параметров оборудования и объектов на сетях газораспределения и газопотребления, который может позволить не только оценивать их текущее состояние и работоспособность, но и дает возможность прогнозировать и предупреждать нештатные ситуации в будущем. Для этого необходимо провести обработку и систематизацию информации от систем мониторинга и контроля, сделать аналитику по различным технологическим процессам, классифицировать события, в том числе более тщательно в части нештатных ситуаций и аварий. Данный вопрос также является актуальным, так как речь идет об эксплуатации опасных производственных объектов и обеспечение безопасности и безаварийности является первоочередным критерием.

В связи с этим возникает **важная научно-техническая задача** совершенствования информационно-измерительных и управляющих систем для объектов газораспределения на основе предиктивной аналитики связанных объектов, математических моделей прогнозирования развития событий, сокращения возникновения нештатных ситуаций, в том числе связанных с выбросом природного газа в атмосферу.

Объектом исследования диссертационной работы является информационно-измерительная и управляющая система территориально распределенными и удаленными объектами газораспределительной сети.

Предметом исследования являются структуры и алгоритмы функционирования информационно-измерительных и управляющих систем в части прогнозирования параметров взаимосвязанных объектов газораспределительных сетей.

Степень разработанности. Исследования в области построения информационно-измерительных и управляющих систем, идентификации объектов, цифровых систем управления представлены в работах Б. Куо, Р. Изерман, П. Эйкхофф, О.Н. Новоселов, Э. Вошни, М. Краус, теорией нейросетей занимались Хайкин Саймон, Джеффри Хинтон, Шолле Франсуа, Йошуа Бенджио, Ян ЛеКун, Джон Маккарти, академик Андрей Ершов, Юрген Шмитхубер – создатель известной нейросетевой архитектуры LSTM.

Целью диссертационной работы является расширение функциональных возможностей информационно-измерительных и управляющих систем объектов газораспределения на основе разработки перспективных структур и алгоритмов их работы.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе сформулированы и решены следующие **задачи исследования:**

1. Проведение аналитического обзора существующих информационно-измерительных и управляющих систем территориально распределенных газораспределительных сетей.
2. Разработка алгоритма виброакустического контроля срабатывания предельного сбросного клапана и определения объемов выброса природного газа в атмосферу в информационно-измерительной и управляющей системе с применением нейросетевых технологий.
3. Разработка структуры и алгоритма работы подсистемы сбора и анализа многопараметрических данных работы оборудования в режиме реального времени и классификация технологических событий работы взаимосвязанного оборудования газораспределительных сетей информационно-измерительной и управляющей системой.
4. Разработка структуры и математической модели объектов информационно-измерительной и управляющей системы территориально распределенных, взаимосвязанных газораспределительных сетей с применением нейросетевых технологий.
5. Экспериментальные исследования сопоставимости моделей и методов прогнозирования информационно-измерительной и управляющей системой технологических параметров газораспределительной сети.

Соответствие паспорту научной специальности. Отраженные в диссертации научные положения соответствуют области исследования (п. 2 «Исследование возможностей и путей совершенствования существующих и создания новых элементов структуры и образцов информационно-измерительных и управляющих систем, улучшение их технических, эксплуатационных, экономических и эргономических характеристик, разработка новых принципов построения и технических решений») специальности 2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие системы.

Методология и методы диссертационного исследования. Методическую и теоретическую базу диссертационной работы составляют подходы теории информационно-измерительных и управляющих систем, нейросетевых платформ и технологий, идентификации и методов математического моделирования.

Исследовательская работа проводилась на контроле параметров объектов газовых сетей в реальном времени, отработка эффективности работы модели ИИУС прорабатывалась на тестовых испытаниях и оценке прогнозных данных.

Теоретическая значимость работы заключается в расширении функциональных возможностей информационно-измерительных и управляющих систем территориально распределенных газораспределительных сетей на основе применения нейросетевых технологий для предиктивного анализа и прогноза технологических параметров объектов газораспределительной сети, **отличающейся тем**, что математическая модель, построенная для связанных объектов и прогнозирование развития событий на одном из них, позволяет спрогнозировать и на всех остальных. Это позволит заблаговременно предупредить нештатную ситуацию на всей разветвленной сети газораспределения. Разработка структуры и математической модели объектов информационно-измерительных и управляющих систем территориально распределенных газораспределительных сетей с применением нейросетевых технологий, **отличающаяся** введением функционала цифровой модели объектов с формированием обучаемого цифрового двойника, что позволяет более точно прогнозировать выходные параметры объектов.

Практическая ценность работы состоит в применении результатов исследований, предиктивной аналитики связанных объектов, разработанных модели и метода для повышения эффективности функционирования информационно-измерительных и управляющих систем, применении результатов при проектировании новой серии систем, значительно упреждающих время прогноза технологических параметров объектов газораспределения, позволяющих классифицировать события на объектах, в том числе о неисправности оборудования и возможных выбросах природного газа в атмосферу.

Положения, выносимые на защиту, обладающие научной новизной.

1. Разработан вновь алгоритм виброакустического контроля срабатывания предельного сбросного клапана с определением объемов выброса природного газа в атмосферу и исправности клапана в информационно-измерительной и управляющей системе с применением нейросетевых технологий.
2. Структуры и алгоритм работы подсистемы сбора и анализа многопараметрических данных работы оборудования в режиме реального времени и классификация технологических событий работы взаимосвязанного оборудования газораспределительных сетей информационно-измерительной и управляющей системой, **отличающейся тем**, что для формирования прогноза параметров создаются и дообучаются цифровые двойники объектов на основе текущих параметров объектов и архивных параметров с заданной глубиной, а также данных о всех проводимых работах и мероприятиях на контролируемых объектах.
3. Структуры и математическая модель объектов информационно-измерительной и управляющей системы территориально распределенных, взаимосвязанных газораспределительных сетей с расширенным функционалом, с применением нейросетевых технологий.
4. Исследование сопоставимости моделей и методов прогнозирования информационно-измерительной и управляющей системой технологических параметров газораспределительной сети.

Степень достоверности результатов. Достоверность полученных результатов подтверждается результатами апробации разработанных методов и, в частности, при внедрении нейросетевых технологий для обработки больших объемов информации на трех группах взаимосвязанных объектах от трех газораспределительных станций.

Реализация и внедрение результатов.

Результаты работы внедрены в информационно-измерительной и управляющей системе объектов газораспределительной сети АО «Газпром газораспределение Тула», в производственные процессы ООО ПКФ «Экс-Форма», ООО «СервисСофт Инжиниринг», ООО «РусГазТехнологии».

Ряд теоретических положений внедрен в учебный процесс на кафедре охраны труда и окружающей среды Института горного дела и строительства Тульского государственного университета.

Апробация работы.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях различного уровня, а именно на VI международной научно-практической конференции «Инновационные наукоемкие технологии» (2019 г.) г. Тула, XXV международной научно-практической конференции «Современные проблемы экологии» (2020 г.) г. Тула, II Всероссийской молодёжной научно-практической конференции «Экология и техносферная безопасность» (2023 г.) г. Тула, ВКС АО «Газпром газораспределение» «О реализации нейросетевых модулей информационно-измерительных и управляющих систем на 10-и объектах газораспределения Ставропольского Края» (Ставрополь, 2023 г.), 5-й практической конференции «Экоэксперт 2023» (2023 г.) г. Тула. Кроме того, результаты диссертационного исследования представлялись и обсуждались на 31-й Международном конкурсе научно-исследовательских работ (2021 г.), а также Петербургских международных газовых форумах (Санкт-Петербург, КВЦ «Экспофорум», 2022, 2023 гг.).

Публикации. Основные научные результаты диссертационной работы опубликованы в 17 печатных работах, из них 4 статьи – в рецензируемых журналах из списка ВАК РФ, 6 докладов на конференциях различного уровня, 2 статьи – в межвузовских сборниках, имеется 2 патента РФ и 3 свидетельств РФ о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Личный вклад автора состоит в непосредственном участии во всех этапах исследований, направленных на совершенствование информационно-измерительных и управляющих систем для объектов газораспределения на основе предиктивной аналитики связанных объектов, математических моделей прогнозирования развития событий, сокращения возникновения нештатных ситуаций, в том числе связанных с выбросом природного газа в атмосферу, а также в формулировании и обоснованности цели и задач исследований, в разработке способов их решений.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов и заключения, изложенных на 163 страницах машинописного текста и включающих 46 рисунков, 8 приложений и списка использованной литературы из 116 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, решению которых посвящена диссертация, отмечаются научная новизна, практическая значимость работы, а также апробация работы, приведена структура диссертации.

В первой главе рассмотрена сеть газораспределения с территориально распределенными объектами и предложено провести исследование взаимосвязей объектов при изменении параметров транспортировки природного газа на одном из них с целью совершенствования информационно-измерительной и управляющей системы, прогнозирующей режимы работы и технологические параметры всех взаимосвязанных объектов и сети газораспределения в целом.

Проведен анализ существующих информационно-измерительных и управляющих систем для газораспределительных сетей. Рассмотренные системы выполняют функции опроса датчиков с параметрами объектов, передачи данной информации на диспетчерские пункты, сигнализации выхода параметров за допустимые пределы, получения управляющего сигнала от диспетчера. Основным их недостатком является отсутствие функции прогнозирования изменений параметров работы газораспределительного оборудования во времени в зависимости от текущей оценки технологического состояния и ранее происходящих процессов в данной сети газораспределения и газопотребления. Это снижает эффективность диспетчерского управления и возможность систем в части прогнозирования и заблаговременного предупреждения возникновения нештатных и аварийных ситуаций.

Наиболее близкой по направлению исследования в диссертации рассмотрена существующая информационно-измерительная и управляющая система, где математическая модель давления газа в трубопроводе рассматривается как модель с транспортным запаздыванием для протяженных объектов газоснабжения. Информационно-измерительная и управляющая система с использованием данной модели для разветвленной трубопроводной газовой сети с множеством элементов мониторинга и управления позволило получить данные в фиксированные моменты времени, то есть получить информационный срез газовой сети в некоторое фиксированное время t .

Очевидно, что прогнозирование в данном случае эффективно только при значительной протяженности газопроводов от десяти километров и выше. Только при этом можно оперативно принять какое-либо решение и предупредить нештатную и аварийную ситуацию. Более 80% распределительных газовых сетей, в том числе взаимосвязанных, имеют меньшую протяженность, что указывает на недостаток данной работы.

В данной диссертационной работе предлагаются модели и методы на основе нейросетевых технологий с созданием цифровых двойников, с помощью которых в информационно-измерительной и управляющей системе дополнительно к существующим функциям формируются прогнозные параметры работы объектов и всей системы в целом на основе ранее полученной и проанализированной информации и параметров работы взаимосвязанных объектов.

Представлена общая методология нейронных сетей с формированием матрицы корреляции входных и выходных параметров, основываясь на общую теорию нейронных сетей.

Сформулирована постановка задач исследования.

Вторая глава посвящена целесообразности совершенствования существующих информационно-измерительных систем в части разработки структуры и математической модели с добавлением эффективных алгоритмов прогнозирования с целью обеспечения качественного процесса эксплуатации опасных производственных объектов и обеспечения бесперебойной поставки природного газа потребителям по сетям газораспределения и газопотребления. В данной главе представлена существующая структура информационно-измерительной и управляющей системы территориально распределенных объектов газовых сетей. Предложены модели прогнозирования параметров территориально-распределенной газовой сети на основе нейросетевых технологий для взаимосвязанных объектов.

Рассмотрена существующая структура информационно-измерительной системы территориально-распределенных объектов газораспределения. Она основана на результатах внедрения аппаратных средств на объектах газоснабжения и широко используемыми в настоящее время практически всеми газораспределительными организациями Российской Федерации системами телеметрии, в том числе установленных на станциях катодной защиты, контрольных пунктах, пунктах редуцирования газа, узлах учета, запорной арматуре.

В рамках решения задачи совершенствования существующей информационно-измерительной и управляющей системы технологий в системе газораспределения, как пример, показаны группы взаимосвязанных объектов в зоне работы двух газораспределительных станций.

Ключевыми составляющими процесса транспортировки (рис.1) являются узлы редуцирования (ПРГ), параметры работы которых напрямую связаны со всеми элементами приведенной структуры, а также имеют постоянно изменяющиеся значения, т.е. находятся в динамике, в связи с чем принято решение на установку на них одно-платных высокоскоростных компьютеров (НК) для реализации совершенствования работы ИИУС. Организационно-технический блок (ОРБ) отвечает за информацию по техническому обслуживанию, режимам газоснабжения, характеристикам потребителей, квалификации персонала и т.д., с оценки которой и приступали при моделировании различных процессов на газовых сетях и формировании цифровой модели (ЦМ) блоком аналитики (БА), описываемых в данной диссертационной работе.



Где $n, b, e, d, l, f, g, h, j, k$ количество взаимосвязанных объектов, КУ-крановые узлы, СКЗ – станции катодной защиты, КИП – контрольно-измерительные пункты в каждом взаимосвязанном объекте, соответственно.

Рисунок 1 - Структура информационно-измерительной системы взаимосвязанных объектов газораспределительной сети.

Представлен функционал виброакустического контроля срабатывания предельного сбросного клапана в информационно-измерительной и управляющей системе с

применением одноплатных высокоскоростных компьютеров (НК), установленных на ПРГ. Определение открытия ПСК нейросетевой классификацией акустических данных реализуется при выполнении программы «Программа распознавания и классификации аудиоданных нейросетью в режиме реального времени» и использованием библиотек Pandas, NumPy, scikit-learn, datetime, matplotlib, librosa, PyAudio. Входными данными являются различные типы виброакустических данных в форме аудио-записей формата wav произвольной продолжительности, предварительно обработанные в аудиоредакторе с целью минимизации пауз и посторонних звуков в записи. Выходные данные: числовые характеристики виброакустических данных в виде параметрических числовых рядов и метки класса, сохраненные в виде таблиц в формате .csv.

Последовательность выполнения: загрузка библиотек librosa, pandas, NumPy, sklearn, sample rate; загрузка аудиофайла в формате wav, характеризующее технологическое событие; преобразование данных аудиофайла на значимые признаки в форме временных рядов с периодизацией фреймов согласно частоте дискретизации записи; создание составного датафрейма аудиоданных в типовом формате: строки по абсолютному времени, столбцы — по именованным признакам ; создание полей экспоненциального среднего по каждому параметру по скользящему окну заданной ширины, удаление исходных полей и поля времени, удаление строк до первого действительного значения экспоненциального среднего; присвоение полученному набору разметки — типовому обозначению технологического события (используется как целевая переменная при обучении нейросети); сохранение созданного набора данных в формате .csv .

Алгоритм расчета объемов выброса основан на фиксации момента срабатывания и закрытия ПСК, фактического давления и диаметра сбросной свечи. Исправность работы ПСК определяется по сравнению параметров его настройки с фактическими значениями давления в моменты открытия и закрытия.

Представлена подсистема сбора и анализа многопараметрических данных работы оборудования, которая реализована посредством передачи данных контроллеров либо компьютеров на сервер связи, организованный на серверном уровне газораспределительной организации. Сервер связи отправляет их на базу данных, откуда они отображаются в интерфейсе. На сервере связи, в качестве дополнительного функционала, работает приложение на ОС Linux, выполняющая прогностику и классификацию по обученной модели нейросети, каждые 12 часов модель переобучается на вновь полученных данных.

Общеорганизационные данные о режимных картах, проведенных технических обслуживаниях и так далее поступают на сервер связи для обработки и кодирования из базы данных, куда они вносятся и периодически дополняются по факту изменений или проведенных работ.

Общая структура формирования подсистемы сбора и обработки данных представлена на рис. 2.

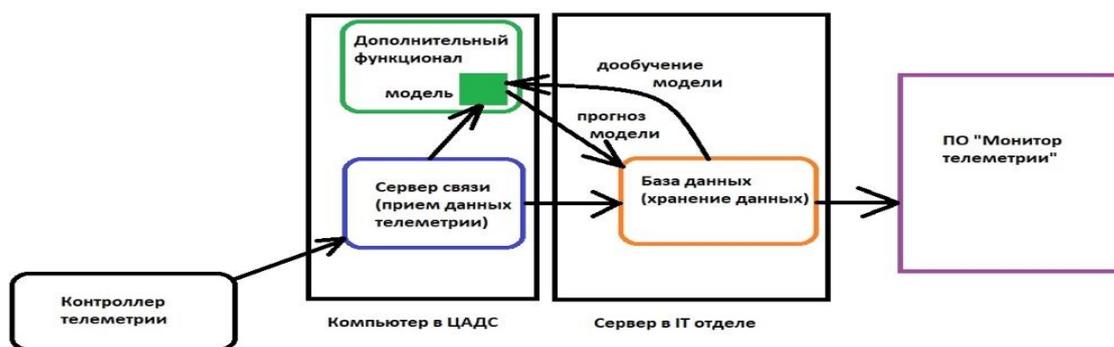


Рисунок 2 - Структурная схема формирования базы данных.

Основная реализация программного кода дополнительного функционала — на Python 3.10.

Используются библиотеки:

Pandas — библиотека создания упорядоченных таблиц данных (датасетов), используемых для подачи на обработку нейросети. Numpy — основная библиотека для осуществления математических преобразований больших массивов данных.

Scikit-Learn — библиотека машинного обучения — по ней выполняется распределение массивов на обучающие, тестовые и валидационные, выполняется расчет метрик выполненных прогнозов. Xgboost — библиотека выполнения обучения модели прогностики на основании градиентного бустинга входных данных. TensorFlow и Keras — средства построения нейронных сетей. TensorFlow — фреймворк (рабочая среда) в которой выполняется процесс обучения, Keras — высокоуровневые инструменты для выполнения обучения на базе TensorFlow.

Программа «Монитор телеметрии» реализована на C# в среде NetFramework 4.5 с адаптацией под Windows и Linux.

Все программные коды непосредственно разработаны при проведении исследовательской работы. Библиотеки, с использованием которых написаны коды — открытые и общедоступные.

На рис. 3 показан алгоритм формирования и обработки данных при взаимодействии компонентов с программной частью цифровой платформы.

В представляемой диссертационной работе предлагается построение новой модели ИИУС с использованием всего массива накопленных данных за время работы систем телеметрии на взаимосвязанных объектах разветвленной газораспределительной сети. Прогноз будет осуществляться по выбранной глубине g накопленных данных и учитывающий взаимосвязь и влияние параметров объектов друг на друга. Глубина данных от нескольких месяцев до нескольких лет, за время шага измерения будем принимать d , которое в дальнейшем будет увеличиваться в процессе обучения системы, о чем будет описано ниже.

При этом вектора состояния объектов представим следующим образом.

$P_{вх\ k} = [P_{вх\ 1} \ P_{вх\ 2} \ P_{вх\ 3} \ \dots \ P_{вх\ n}]$, где $n=1,2,3,\dots,g/d$ - давление газа на входе k - го объекта газораспределения, МПа; $k = 1,2,3 \dots m$;

$l_1^1 = l_2^2 = \dots = l_m^m = 1$ - количество взаимосвязанных объектов газораспределительной сети,

$P_{вых\ k}$ - m - давление газа на выходе k - го объекта газораспределения, МПа.

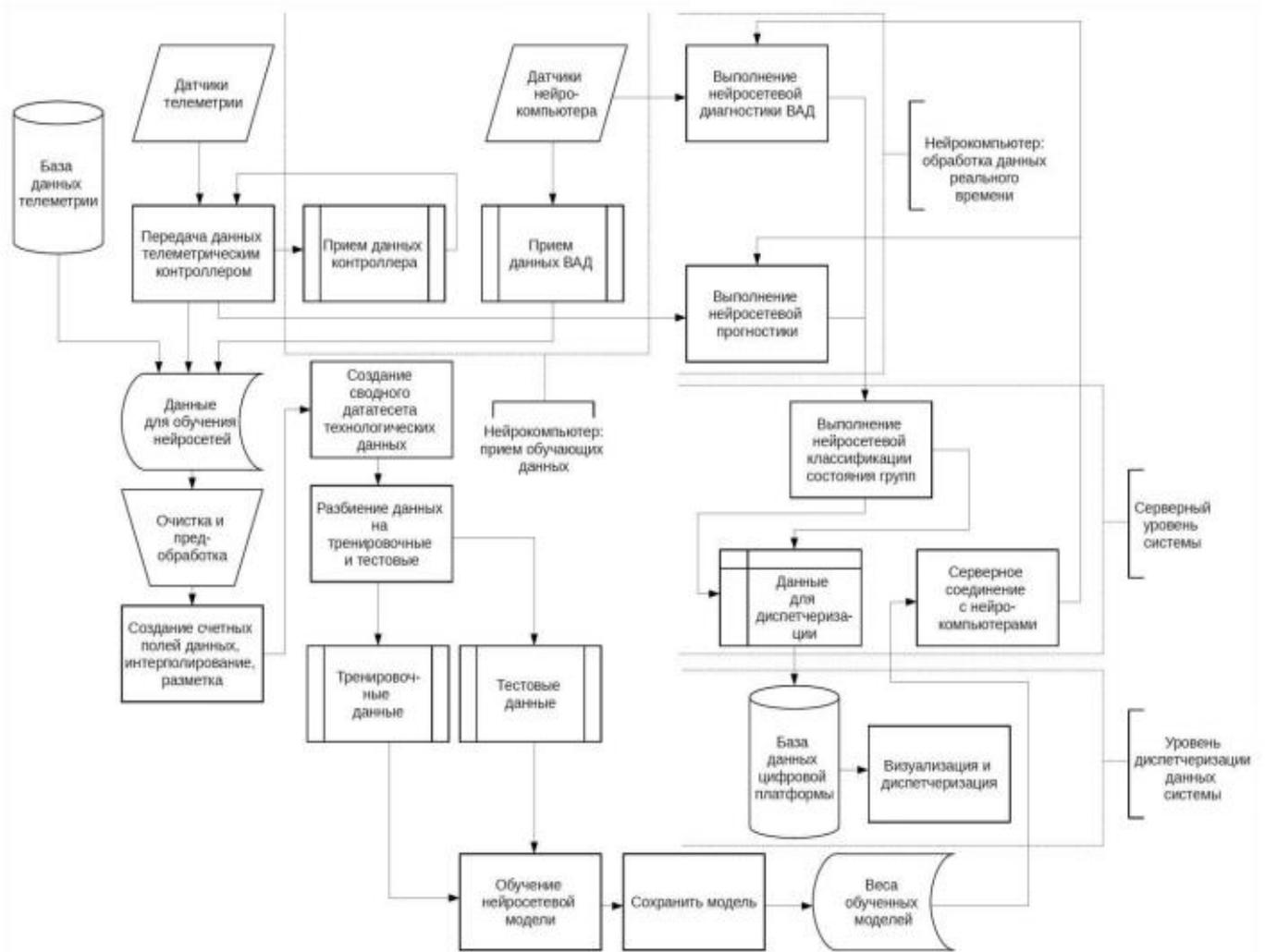


Рисунок 3 – Алгоритм формирования и обработки данных при взаимодействии компонентов с программной частью цифровой платформы.

Аналогичным образом представляются вектора всех измеряемых датчиками параметров объекта. Для наглядности представления модели будем использовать основные параметры датчиков, вспомогательные, а также вышеописанные организационные представим как единый параметр общеорганизационный $A_{орг}$, который в процессе работы ИИУС будет постоянно корректироваться в процессе обучения системы.

Q – величин потока газа на k – м объекте, м³/час;

C_k – величина загазованности k – го объекта, мг/м³;

$t_{вх}$ - температура газа на входе k – го объекта, град, С;

$t_{вых k}$ - температура газа на выходе k – го объекта, град, С;

$U_{ном k}$ - величина защитного потенциала на k – м объекте, вольт, В;

$I_{ном k}$ - величина защитного тока на k – м объекте, ампер, А;

$skl k$ - срабатывание защитных клапанов на k – м объекте, сработал – «1»; нет – «0»;

$A_{оргk}$ – общеорганизационный весовой параметр k -го объекта, учитывающий качество обслуживания, сроки эксплуатации оборудования и т.д.

Так как будем учитывать взаимосвязи всех параметров взаимосвязанных объектов и матрица параметров k – го объекта будет выглядеть следующим образом:

$$F_k = \begin{pmatrix} P_{\text{ВХ1}}^k & P_{\text{ВХ2}}^k & \dots & \dots & P_{\text{ВХn}}^k \\ P_{\text{ВЫХ1}}^k & P_{\text{ВЫХ2}}^k & \dots & \dots & P_{\text{ВЫХn}}^k \\ Q_1^k & Q_2^k & \dots & \dots & Q_n^k \\ C_1^k & C_2^k & \dots & \dots & C_n^k \\ t_{\text{ВХ1}}^k & t_{\text{ВХ2}}^k & \dots & \dots & t_{\text{ВХn}}^k \\ t_{\text{ВЫХ1}}^k & t_{\text{ВЫХ2}}^k & \dots & \dots & t_{\text{ВЫХn}}^k \\ U_{\text{ПОТ1}}^k & U_{\text{ПОТ2}}^k & \dots & \dots & U_{\text{ПОТn}}^k \\ I_{\text{ПОТ1}}^k & I_{\text{ПОТ2}}^k & \dots & \dots & I_{\text{ПОТn}}^k \\ S_{\text{kl1}}^k & S_{\text{kl2}}^k & \dots & \dots & S_{\text{kln}}^k \\ A_{\text{орг1}}^k & A_{\text{орг2}}^k & \dots & \dots & A_{\text{оргn}}^k \end{pmatrix} \quad (1)$$

Где:

$k = 1, 2, 3 \dots m$; m – количество взаимосвязанных объектов газораспределительной сети

$n = 1, 2, 3 \dots g/d$, g – глубина данных, s ; d – время шага измерений, s .

Накопленные данные по каждому шагу измерения позволяют в n – ый момент показывать отклонение каждого параметра от номинальных значений и таким образом можно представить матрицу отклонений параметров взаимосвязанных m -объектов газораспределения:

$$v = \begin{pmatrix} v_{P_{\text{ВХ1}}}^k & v_{P_{\text{ВЫХ1}}}^k & v_{Q_1}^k & v_{C_1}^k & v_{t_{\text{ВХ1}}}^k & v_{t_{\text{ВЫХ1}}}^k & v_{U_{\text{ПОТ1}}}^k & v_{I_{\text{ПОТ1}}}^k & v_{S_{\text{kl1}}}^k & v_{A_{\text{орг1}}}^k \\ v_{P_{\text{ВХ2}}}^k & v_{P_{\text{ВЫХ2}}}^k & v_{Q_2}^k & v_{C_2}^k & v_{t_{\text{ВХ2}}}^k & v_{t_{\text{ВЫХ2}}}^k & v_{U_{\text{ПОТ2}}}^k & v_{I_{\text{ПОТ2}}}^k & v_{S_{\text{kl2}}}^k & v_{A_{\text{орг2}}}^k \\ \dots & \dots \\ \dots & \dots \\ v_{P_{\text{ВХn}}}^k & v_{P_{\text{ВЫХn}}}^k & v_{Q_n}^k & v_{C_n}^k & v_{t_{\text{ВХn}}}^k & v_{t_{\text{ВЫХn}}}^k & v_{U_{\text{ПОТn}}}^k & v_{I_{\text{ПОТn}}}^k & v_{S_{\text{kin}}}^k & v_{A_{\text{оргn}}}^k \end{pmatrix} \quad (2)$$

Где:

$k = 1, 2, 3 \dots m$; $n = 1, 2, 3 \dots g/d$, g – глубина данных, s ; d – время шага измерений, s .

v – коэффициент, показывающий величину отклонения параметра в каждый момент n от установленного диапазона нормальных значений или технологического коридора взаимосвязанного объекта m .

Таким образом математическая модель состояния k -го объекта в зависимости от состояния и отклонений взаимосвязанных m объектов условно можно представить в следующем виде:

$$M_k^n = F_k v_k, \quad (3)$$

А модель информационно-измерительной и управляющей системы состояния в зависимости от состояния параметров на k -м взаимосвязанном объекте представляется в следующем виде:

$$M_{\text{иис}} = \begin{pmatrix} l_1^1 F_1 & l_1^2 F_1 & \dots & \dots & l_1^m F_1 \\ l_2^1 F_2 & l_2^2 F_2 & \dots & \dots & l_2^m F_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ l_m^1 F_m & l_m^2 F_m & \dots & \dots & l_m^m F_m \end{pmatrix} \quad (4)$$

Или

$$M_{\text{иис}} = Y_m = L_m F_m \quad (5)$$

Где F_k – матрица текущих параметров, Y_m – прогнозные данные модели,

$l_1^1 = l_2^2 = \dots = l_m^m = 1$, l_m^k = коэффициент влияния k-го объекта на каждый m-ый объект.

Выход u_{ki} этого нейрона вычисляется, как взвешенная сумма элементов ключевого образа f_k по следующей формуле:

$$y_{ki} = \sum_{j=1}^m l_{ij}(k) f_{kj}, \quad i=1, 2, \dots, m \quad (6)$$

$l_{ij}(k)$, $j=1, 2, \dots, m$ - синаптические веса нейрона i , соответствующие k-ой паре ассоциированных образов, а элемент y_{ij} можно записать в эквивалентном виде:

$$y_{ij} = l_{i1}(k), l_{i2}(k), \dots, l_{im}(k) \begin{bmatrix} f_{k1} \\ f_{k2} \\ \dots \\ f_{km} \end{bmatrix}, \quad i=1, 2, \dots, m \quad (7)$$

Для технического решения работы данной модели построена структура совершенствованной информационно-измерительной и управляющей системы, приведенная на рис. 4.

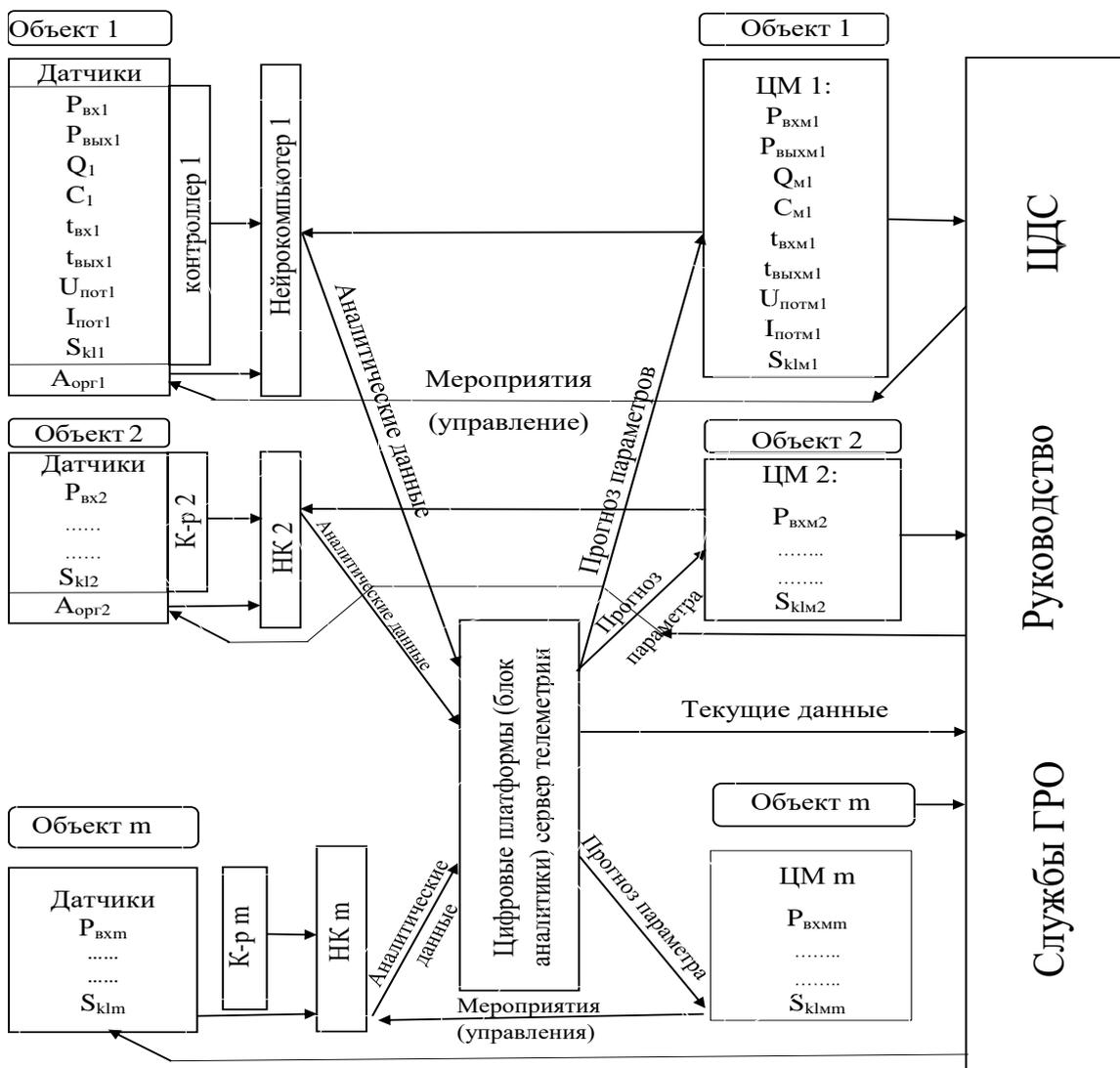


Рисунок 4 - Структура совершенствованной информационно-измерительной и управляющей системы с функцией прогноза.

Разработанная математическая модель обработки телеметрических данных и, соответственно, метод прогнозирования, основанный на решении матрицы корреляции заданного набора показателей телеметрических каналов, распределенных по объектам телеметрии газораспределительной сети и по времени

приема данных (частный случай временных рядов), прямо располагает к применению программных инструментов базовой методологии нейронных сетей. Подсистема сбора и анализа многопараметрических данных реализована на цифровой платформе с применением различных библиотек с последующей программной кодировкой прогнозных параметров обученной модели для передачи данных.

Третья глава посвящена разработке нейронной сети обработки потоков данных объектов газораспределения информационно-измерительной и управляющей системы.

Обучение нейронной сети проведено на потоках данных дистанционного мониторинга территориально распределенных объектов газораспределения.

Приведена реализация классификационной нейросети группы контрольных объектов. Классификатор состояния группы объектов на стадии первичной модели решен в качестве классификационной сети MLP со всеми параметрами входов по каналам давления одной из групп контрольных объектов.

На начальной фазе обработки, показания каналов вместе с данными архива аварий рабочей базы данных позволяет кодировать состояние отдельных объектов. На рис. 5 приведена мнемосхема состояния группы объектов.

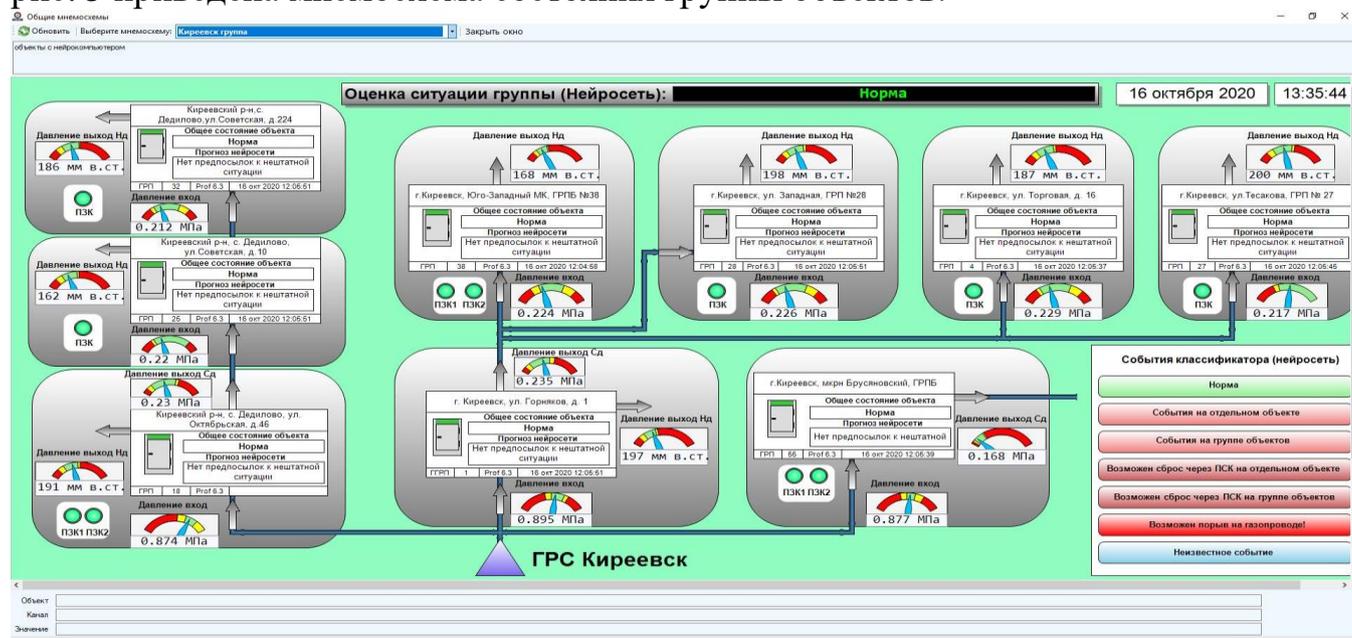


Рисунок 5 - Классификационная мнемосхема состояния группы объектов.

Окна групповой мнемосхемы:

Общие:

«Оценка ситуации группы (Нейросеть)» - текущее действительное значение классификатора;

Дата /время — актуальное дата и время системы;

События классификатора — таблица действующих индексов значения состояния сети;

В отдельных информационных блоках каждого объекта:

Показания основных каналов давления;

Состояние двери технического помещения (для контроля входа на объект);

Состояние ПЗК (для контроля открытости тех или иных участков газопровода);

Общее состояние объекта — по коду статуса объекта в настоящем времени;

Прогноз нейросети — индекс сообщения регрессионной сети, формируемый одно-
платным высокоскоростным компьютером по каждому объекту;

Информационные данные об объекте — включая время получения последнего акту-
ального значения телеметрии отдельного объекта (актуального время объекта);

Направления движения газа, иллюстрирующие взаимосвязи объектов между собой.

Представлены подходы прогнозирования изменения технологических парамет-
ров и возможного появления аварийных ситуаций на объектах сетей газораспреде-
ления. На уровне единой последовательной модели обработки и визуализации актуаль-
ной информации данной исследовательской работы сложилась модель единого про-
граммно-аппаратного комплекса с рабочим названием «Цифровая платформа» для
осуществления аналитики актуальных данных телеметрии со сквозным применением
передовых технологий обработки с элементами искусственного интеллекта.

В качестве аппаратного низового звена комплекса на контрольные объекты
устанавливаются одноплатные высокоскоростные компьютеры с программным обес-
печением, позволяющем обрабатывать основные данные давления газа на участках
регрессионной прогностической нейросетью, реализованной непосредственно на базе
одноплатного высокоскоростного компьютера. При масштабировании данной си-
стемы на значительное количество объектов появилась возможность установить вза-
имосвязи объектов подключенных к одному источнику газоснабжения – ГРС. При
данном подходе сформировался второй подход и метод прогнозирования с нейросе-
тевой обработкой параметров объектов и формированием цифровых двойников с про-
гнозом параметров непосредственно на цифровой платформе, а именно на сервере
связи и передачи данных. Первый уровень нейросетевого анализа оставлен только на
проблемных объектах для высокочастотной обработки виброакустического контроля
срабатывания ПСК.

Отображение информации на пульте диспетчера текущих и прогнозных пара-
метров объектов при обоих методах, принятой из базы данных и сервера связи поз-
воляют предупредить и значительно минимизировать количество аварийных и не-
штатных ситуаций на газовых сетях.

Общим итогом комплексного исследования данных аналитической системы и
её оповещений стал практический опыт работы системы по всем уровням реализации,
который показал, что сообщения прогностической нейросети в составе ЕСЦД свое-
временны, адекватны реальным ситуациям, интерпретируемы от фактических собы-
тий и применение её целесообразно прикладным задачам эффективности работы сети
газораспределения.

В четвертой главе представлена техническая реализация и результаты экспе-
риментальных исследований информационно-измерительной и управляющей си-
стемы территориально распределенных объектов газораспределения.

Основной задачей является обобщение полученных результатов и внедрение их в
производственную деятельность.

На рис. 6 показано смонтированное оборудование в контрольном щите. На
рис.7 – на ПСК.

Представлены результаты мониторинга и исследования дистанционных пото-
ков данных, а также обзор событий на территориально распределенных объектах га-
зораспределения групп взаимосвязанных объектов от двух газораспределительных
станций.



Рисунок 6 - Установка компьютера. Общий вид.



Рисунок 7 - Установка оборудования на свече.

Обзор событий показал эффективное применение нейросетевой прогностики для контроля работоспособности технологического оборудования и обучения нейросети. Так по постоянно меняющимся показателям отклонения от прогноза и росту амплитуды значения давления классифицируется неисправность регулятора давления (рис. 8.)

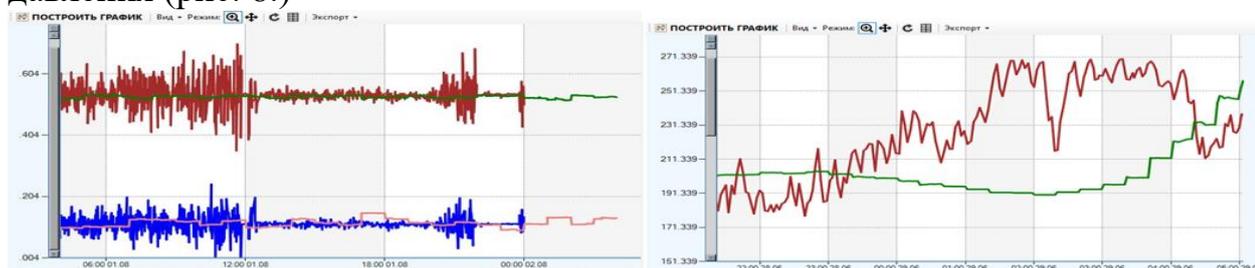


Рисунок 8 - График выходного давления неисправного регулятора.

Рисунок 9 - Графики выходного давления и прогнозного на ПРГ.

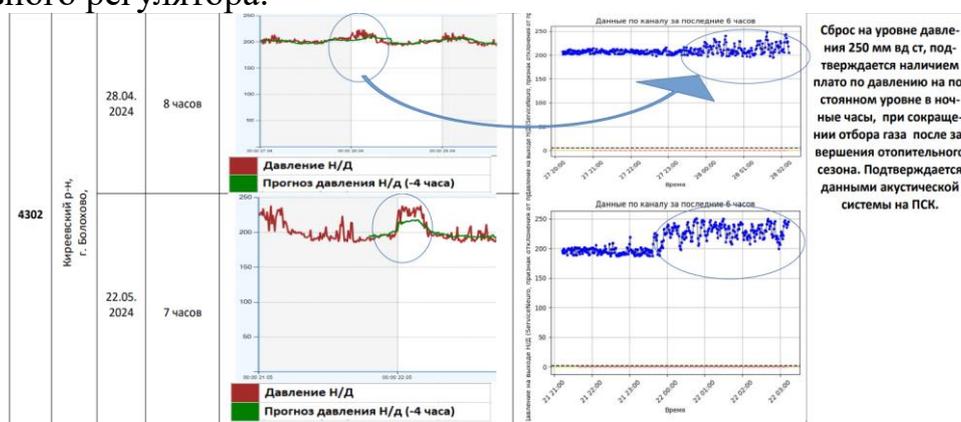


Рисунок 10 – Графики давления (фактического и прогнозного) и графики данных виброакустической системы.

Прогностика позволяет аналитически выявлять факт сброса газа через ПСК (рис. 9). Диагностируется по нескольким подряд показателям завышения давления на выходе от прогноза.

Показана реализация функционала контроля срабатывания предельного сбросного клапана в информационно-измерительной и управляющей системе с применением нейросетевых технологий.

Данные датчика акустики записываются микрофоном в файлы wav непосредственно в память одноплатного высокоскоростного компьютера для дальнейшего разбора на мощном сервере средствами специализированных библиотек librosa и PyAudio в программной среде Python 3.

На рис. 10 показан наиболее информативный фрагмент аудиозаписи в течение 30 мин, на котором обозначены периоды речи наладчиков и виброакустических проявлений монтажа, а также контрольный период сброса газа через ПСК.

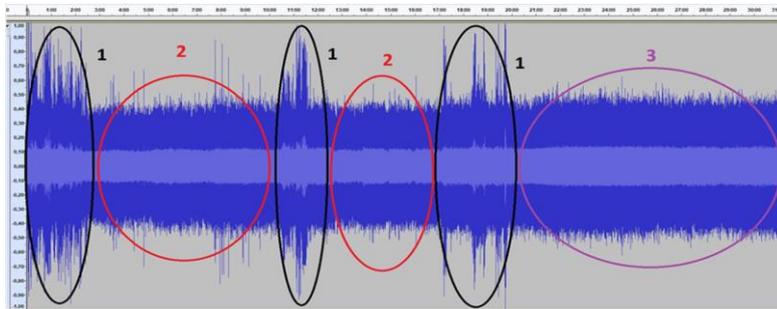


Рисунок 10 -Фрагмент аудиозаписи: 1,3 - стандартный шумовой фон после завершения работ, 2 - тестовые сбросы через ПСК.

Анализ данных показывает, что существуют характерные различия аудиограммы при обычном виброакустическом фоне работы газораспределительного пункта и при сбросе природного газа через ПСК.

Одноплатный высокоскоростной компьютер устанавливается непосредственно на объекте газораспределения и работает в двух режимах.

В режиме сбора данных для фиксации точного времени открытия ПСК на объекте газораспределения дополнительно устанавливается прибор контроля загазованности на выходе сбросной свечи, а также вибрационный и акустический датчики. В режиме работы одноплатный высокоскоростной компьютер считывает исходные данные работы оборудования и пропускает через ранее обученную нейронную сеть. В результате нейронная сеть контролирует работу ПСК. При выявлении неисправностей одноплатный высокоскоростной компьютер по GSM передает данные в диспетчерский пункт газораспределительной организации.

Были произведены синхронные записи параметров загазованности в результате срабатывания ПСК, давления, значения вибро- и ауди- параметров. Аудиозапись с микрофона в процессе контрольной проверки сброса газа через ПСК проводилась на частоте 8 кГц. Предварительный анализ показал, что аудиозапись является наиболее информативной при мониторинге состояния ПСК.

Все данные полученные при проведении исследований эффективны для использования нейросетью, осуществляющей контроль и анализ телеметрических данных работы оборудования на сетях газораспределения и газопотребления. На 8-ми объек-

тах из 20-ти, оснащенных одноплатными высокоскоростными компьютерами, в отдельно взятой районной эксплуатационной газовой службе были зафиксированы периодически повторяющиеся сбросы газа в атмосферу.

Настройки предельно-запорной арматуры проведены в соответствии с рабочими параметрами газовых сетей и расчетными режимами газопотребления на основании скорректированных режимных карт.

На основе проведенных исследований и внедрения в эксплуатацию для повсеместного использования на пунктах редуцирования газа разработана технология установки и применения нейросетевых технологий для определения момента срабатывания сбросных клапанов и объемов выброса природного газа в атмосферу. Подробно указанная технология приведена в Приложении В.

В заключении сформулированы основные выводы и результаты, полученные в диссертационной работе.

В приложении приведены программные и технологические решения, акты внедрения результатов диссертации в производстве и использования в учебном процессе.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой поставлена и решена задача совершенствования информационно-измерительных и управляющих систем для объектов газораспределения на основе предиктивной аналитики связанных объектов, математических моделей прогнозирования развития событий, сокращения возникновения нештатных ситуаций, в том числе связанных с выбросом природного газа в атмосферу.

Проведены исследования и получены результаты.

1. Разработан алгоритм виброакустического контроля срабатывания предельного сбросного клапана с определением объемов выброса природного газа в атмосферу и исправности датчика в информационно-измерительной и управляющей системе с применением нейросетевых технологий.
2. Разработана структура и алгоритм работы подсистемы сбора и анализа многопараметрических данных работы оборудования в режиме реального времени и классификация технологических событий работы взаимосвязанного оборудования газораспределительных сетей информационно-измерительной и управляющей системой.
3. Разработана структура и математическая модель объектов информационно-измерительной и управляющей системы территориально распределенных, взаимосвязанных газораспределительных сетей с применением нейросетевых технологий.
4. Проведены экспериментальные исследования сопоставимости моделей и методов прогнозирования информационно-измерительной и управляющей системой технологических параметров газораспределительной сети подтверждающие работоспособность дополнительных функционалов системы.

Результаты проведенных исследований и внедрения совершенствованной информационно-измерительной и управляющей системы с нейросетевой прогностикой позволили определить неисправность шести регуляторов давления, своевременно сообщить о возможных двух порывов газопроводов, что было оперативно устранено аварийными бригадами до полного отключения нескольких населенных пунктов. За период исследования и подготовки диссертационной работы на 48 контрольных объектах, оснащенных одноплатными высокоскоростными компьютерами отсутствовали

сбросы природного газа в атмосферу на 37 объектах, на 4 объектах с определенной периодичностью выбросы составляли до 10% НКПР (Нижний концентрационный предел распространения пламени), на 5 выше 10% НКПР, на 3 абсолютные, т.е. полное открытие клапана. Проведенная дополнительная настройка предельных сбросных клапанов и частичная их замена позволило предотвратить значительный объем газа в атмосферу, что важно, как с экономической, так и экологической точки зрения.

В зависимости от категории неисправности нейросеть затрачивает на классификацию события 2-5 минут. При неисправности регулятора давления, учитывая работу всего оборудования в пределах технологических установок от одного до шести часов.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых журналах из списка ВАК

1) Алексеева П.Г., Маслова А.А., Панарин В.М., Царьков Г.Ю., Баландин А.В./ Аprobация единой системы цифровых двойников в действующей системе диспетчеризации для предупреждения выбросов природного газа // Автоматизация в промышленности. 2022. № 7. С. 24-27.

2) Алексеева П.Г., Панарин В.М., Маслова А.А./Создание единой системы цифровых двойников на объектах распределения природного газа с применением нейросетевых технологий // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2022. № 7. С. 1-6.

3) Панарин В. М. Применение нейрокомпьютеров для контроля работы сбросного клапана в пунктах редуцирования природного газа/ Панарин В.М., Царьков Г.Ю., Панарин М.В., Маслова А.А., Алексеева П.Г.// Автоматизация в промышленности. 2021. № 8. С. 56-59.

4) Панарин В. М. Исследование данных и оповещений от единой системы цифровых двойников объектов сетей газораспределения/ Панарин В.М., Маслова А.А., Алексеева П.Г.// Автоматизация в промышленности. Апрель 2024 г. С. 39-42.

Объекты интеллектуальной собственности

5) Пат. 2643109 Рос. Федерация: МПК G05D 27/02 Устройство дистанционного контроля параметров условий труда с коррекцией по температуре/ Авторы: Мешалкин В.П., Панарин В.М., Гришаков К.В., Горюноква А.А., Котова Е.А., Алексеева П.Г., Скопцова Т.А., Гришакова О.В.; заявитель и патентообладатель ТулГУ. - № 2017114834; заявл. 26.04.2017; опубл. 30.01.2018. Бюл. № 4.

6) Пат. 2652701 Рос. Федерация: МПК G05D 27/02 , G06F 17/00 Устройство дистанционного контроля параметров условий труда в условиях загазованности/ Авторы: Мешалкин В.П., Панарин В.М., Гришаков К.В., Горюноква А.А., Котова Е.А., Алексеева П.Г., Скопцова Т.А., Гришакова О.В.; заявитель и патентообладатель ТулГУ. - № 2017120768; заявл. 13.06.2017; опубл. 28.04.2018. Бюл. № 13.

7) Свидетельство на регистрацию программы для ЭВМ № 2021681280 Программа поддержки принятия решений в процессе подготовки заявки на защиту интеллектуальной собственности в качестве изобретения на устройство. Авторы: Панарин В.М., Мешалкин В.П., Светличный А.А., Панарина Д.В., Коряков А.Е., Рылеева Е.М., Маслова А.А., Туляков С.П., Гришаков К.В., Алексеева П.Г. Заявка № 2021680614 от 13.12.2021. Дата регистрации: 20.12.2021.

8) Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2022611044 Программа автоматизированной системы непрерывного контроля выбросов загрязняющих веществ предприятий/Панарин В.М., Маслова А.А., Рылеева Е.М., Алексеева П.Г., Архипов А.В., Трещев Д.В.// Заявка № 2022610170 от 11.01.2022. Дата регистрации 18.01.2022.

9) Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2022611496 Программа дистанционного мониторинга автоматизированной системы непрерывного контроля выбросов загрязняющих веществ в атмосферу/ Панарин В.М., Маслова А.А., Рылеева Е.М., Алексеева П.Г., Архипов А.В., Трещев Д.В.// Заявка № 2022610139 от 11.01.2022. Дата регистрации 26.01.2022.

Другие публикации

10) Алексеева П.Г. Анализ данных телеметрии для прогнозирования нештатных ситуаций на объектах газораспределения и газопотребления // Современные проблемы экологии: доклады XXV междунар. науч.-практич. конференции под общ. ред. В.М. Панарина. – Тула: Инновационные технологии, 2020.С. 188-191.

11) Алексеева П. Г. Аппаратная база диагностики срабатывания сбросного клапана// Экология и техносферная безопасность: доклады II Всерос. молодёжной науч.-практич. конференции под общ. ред. В.М. Панарина. – Тула: Инновационные технологии, 2023. – С. 187-189.

12) Алексеева П. Г. Моделирование определения объема выброса газа при срабатывании сбросного клапана в пункте редуцирования газа//Приоритетные направления развития науки и технологий. Доклады XXXIII международной научно-практической конференции под общ. ред. В.М. Панарина. – Тула: Инновационные технологии, 2023. – С. 188-190.

13) Алексеева П. Г. Определение момента срабатывания сбросного клапана с применением нейрокompьютера в режиме реального времени// Экология и техносферная безопасность: доклады II всерос. Молодёжной науч.-практич. конференции под общ. ред. В.М. Панарина. – Тула: Инновационные технологии, 2023. – С. 185-187.

14) Алексеева П. Г. Реализация классификационной нейросети группы контрольных взаимосвязанных объектов сети газораспределения//Приоритетные направления развития науки и технологий. Доклады XXXIII международной научно-практической конференции под общ. ред. В.М. Панарина. – Тула: Инновационные технологии, 2023. – С. 258-260.

15) Алексеева П. Г. Структура и модель информационно-измерительной и управляющей системы взаимосвязанных объектов газораспределительной сети с функцией прогноза//Приоритетные направления развития науки и технологий. Доклады XXXIII международной научно-практической конференции под общ. ред. В.М. Панарина. – Тула: Инновационные технологии, 2023. – С. 164-169.

16) Алексеева П. Г. Технология определения момента срабатывания сбросного предохранительного клапана в пунктах редуцирования природного газа с применением нейросетевых технологий// Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 7. – С. 691-694.

17) Алексеева П.Г. Разработка программно-аппаратного комплекса прогнозирования и минимизации выбросов природного газа в атмосферу / Г.Ю. Царьков, П.Г. Алексеева, И.Г. Панькова // Под ред. В.М. Панарина. Тула: Изд-во «Инновационные технологии» ТулГУ. – 2019. – С.71-72.

Подписано в печать 21.10.2024

Формат бумаги 70x100 1/16. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 1,3. Тираж 75 экз. Заказ ____.

Отпечатано в Издательстве ТулГУ. 300012, г. Тула, просп. Ленина, 95