

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

На правах рукописи

УДК 004.942

Романчук Сергей Михайлович

**РАСПРЕДЕЛЕННАЯ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩАЯ СИСТЕМА
РЕЖИМАМИ РАБОТЫ МУНИЦИПАЛЬНОЙ ВОДОПРОВОДНОЙ СЕТИ**

Специальность 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям) (технические науки)

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук,
профессор, Беспалова С.В.

Идентичность всех экземпляров
ПОДТВЕРЖДАЮ
Ученый секретарь
диссертационного совета Д 01.024.04
канд.тех.наук

Т.В. Завадская

Донецк - 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
РАЗДЕЛ 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ...	10
1.1. Развитие городских систем водоснабжения как объектов мониторинга и управления технологическими режимами.....	10
1.2. Автоматизированные системы мониторинга и управления водоснабжением и водоотведением.....	20
1.3. Методы анализа данных и моделирования процессов при мониторинге систем водоснабжения	31
1.4. Выводы и задачи исследования.....	38
РАЗДЕЛ 2 ФОРМАЛИЗАЦИЯ ОБЪЕКТОВ МОНИТОРИНГА СИСТЕМЫ ВОДОСНАБЖЕНИЯ ГОРОДА.....	41
2.1. Характеристика объекта автоматизации и методика проведения исследований.....	41
2.2. Реализация технологической системы мониторинга режимов водоснабжения Киевского района г. Донецка	47
2.3. Разработка программного обеспечения подсистемы мониторинга режимов водоснабжения объектов.....	55
2.4. Закономерности и статистические модели формирования режимов работы городских систем водоснабжения.....	66
2.4.1 Модели распределенных лагов подкачивающих насосных станций.....	69
2.4.2 Модели участков водораспределительных сетей.....	76
2.4.3. Регрессионные модели режимов работы водораспределительных сетей.....	82
2.4.4. Напорные и энергетические характеристики систем водоподачи при регулировании технологических режимов.....	95
2.5. Выводы по разделу.....	100

РАЗДЕЛ 3 РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ СИСТЕМЫ ВОДОНАБЖЕНИЯ ГОРОДА.....	103
3.1. Оперативное управление городскими системами водоподачи и водораспределения.....	103
3.2 Реализация технологической системы управления режимами водоснабжения Киевского района г. Донецка.....	113
3.3. Разработка алгоритмов управления систем водоснабжения с множественными элементами регулирования.....	120
3.3.1. Алгоритмы управления подкачивающими насосными станциями.....	122
3.3.2. Алгоритмы управления и мониторинга технологическими режимами для участков водораспределительных сетей.....	127
3.3.3. Алгоритмы управления водопроводными узлами.....	128
3.4. Предсказательные модели систем управления режимами водоснабжения.....	135
3.5. Выводы по разделу.....	148
РАЗДЕЛ 4 СОЗДАНИЕ ТЕРРИТОРИАЛЬНО-РАСПРЕДЕЛЕННЫХ АСУ ТП ВОДОСНАБЖЕНИЯ ГОРОДОВ	151
4.1. Развертывание автоматизированных систем управления технологическими процессами предприятий водоснабжения	151
4.2. Внедрение результатов работы и пути развития системы.....	159
4.3. Выводы по разделу.....	161
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	163
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	165
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	166
ПРИЛОЖЕНИЕ А Структура корпоративной информационной системы КП «Донецкгорводоканал», обеспечивающей поддержку технологических процессов.....	183
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Копия документа о внедрении результатов исследований.....	184
ПРИЛОЖЕНИЕ В Копия документа о внедрении результатов исследований в учебный процесс.....	185

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Одной из наиболее актуальных проблем, которые стоят перед коммунальным хозяйством республики, является проблема снижения энерго- и ресурсопотребления систем водоснабжения и водоотведения, решение которой невозможно без создания современной распределенной информационно-управляющей системы режимами работы муниципальной водопроводной сети.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Работа выполнена в соответствии с планами научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ ГОУВПО «Донецкий национальный университет», выполняемых в рамках НИР 15,17,19-1вв/1, конкурса проектов и программ развития местного самоуправления: «Формирование системы комплексного управленческого контроля и мониторинга показателей технологических режимов в коммунальных системах жизнеобеспечения на уровне органов местного самоуправления в Киевском районе г. Донецка», «Разработка и внедрение пилотных элементов электронного управления коммунальной инфраструктурой Пролетарского района г. Донецка», «Формирование эффективного управления процессами обеспечения территориальной громады услугами коммунального назначения посредством применения новейших информационных технологий (г. Моспино)», «Путем к цифровому Донецку».

Степень разработанности темы исследования. Вопросами совершенствования условий эксплуатации систем водоотведения, оценки качества питьевой воды, а также проблемами автоматизации систем управления процессами водоснабжения посвящено достаточное количество отечественных и зарубежных трудов.

Отечественные разработки авторов Рябченко И.Н., Самойленко Н.И., Маслак В.Н., Холодной Т.А., представляют собой технические решения автоматизированных систем управления, в основе которых заложены интеллектуальные технологии. Евдокимов А.В., Петросов В.А. в своих научных работах особое внимание уделяют прогнозированию отказов и устойчивости

водоснабжения. Тевяшев А.Д. предложил математические модели и метод оперативного планирования режимов работы насосных станций. Карамбиновым С. Н. предложено использование генетического алгоритма в задачах теории подачи и распределения воды. Из зарубежных трудов наиболее актуальными являются работы Драгана Савич (директор Научно-исследовательского институт водных циклов KWR), например, в вопросах моделирования и управления водораспределением.

Однако, несмотря на внушительный объем исследований, направленных на повышение эффективности водоснабжения жилых массивов, синтезу автоматизированных систем управления на основе информационно-аналитической модели уделяется недостаточно внимания. В этих исследованиях не учитываются технические возможности узлов системы, множественный доступ управления, режимы их работы, технические характеристики элементной базы. Разработчики зачастую при проектировании элементов и узлов системы автоматического управления (САУ), не учитывают переходные процессы в нестационарных режимах работы автоматизированных систем управления водоснабжением (СУВ).

Цель и задачи исследований. Целью настоящей работы является повышение эффективности процесса водоснабжения городов, за счет создания автоматизированной системы управления, включающей информационно-аналитическую многоуровневую систему с множественным доступом.

Для достижения цели в диссертационной работе поставлены и решены следующие научно-технические **задачи**:

- проведен анализ существующих муниципальных систем водоснабжения, методов и средств автоматизированного мониторинга и управления, для выяснения особенностей режимов работы СУВ с множественным доступом;

- осуществлены сбор и систематизация информации об особенностях изменения технологических параметров и эксплуатационных режимов систем управления водоснабжением с множественными элементами регулирования;

- создана математическая модель автоматизированной системы управления водоснабжением с множественными элементами регулирования и режимов ее работы как единого объекта;

- разработаны методы организации мониторинга режимов работы и управления процессами водоснабжения больших жилых массивов, использующих алгоритмы интеллектуализации решения прикладной задачи;

- создан комплекс технических и программных средств, направленных на повышение эффективности и экономичности работы СУВ.

Объектом исследования являются режимы работы водораспределительных систем при управлении водоснабжением городов.

Предметом исследования являются технологии мониторинга и управления водоснабжением городов.

Научная новизна полученных результатов состоит в следующем.

1. Впервые приведены к формальному виду эксплуатационные режимы автоматизированной системы управления водоснабжением (АСУВ), имеющей множественные элементы регулирования, обеспечивающие поддержание заданного давления в диктующих точках сети, *отличающиеся тем*, что рабочий цикл насосной станции, работающей на водопроводную сеть и определяющей поддержание заданного давления, может быть представлен в виде временного ряда с линейными коэффициентами, между напором станции и давлением в диктующих точках сети, при коэффициентах корреляции выше 0,9.

2. Впервые, получена динамическая математическая модель АСУВ с множественными элементами регулирования, основанная на ее декомпозиции на простые технологические подсистемы, *отличающаяся тем*, что для описания режимов работы подсистем контроля, модулей определения характеристик гидравлических режимов подсистем и идентификации параметров модели, используются результаты решения комплекса прогнозных задач АСУ ТП на текущий и предстоящий периоды.

3. Получила дальнейшее развитие методология управления процессами водоснабжения больших жилых массивов, основанная на распознавании внештатных режимов и аварийных ситуаций, обеспечивающая повышение

эффективности и экономичности работы систем водоснабжения и направленная на реализацию адаптивного микропроцессорного управления режимами водоснабжения на объектных уровнях и оперативно - диспетчерского управления на центральном уровне, *отличающаяся* интегрированным совмещением алгоритмов управления на объектных уровнях в зависимости от сложности объектов управления, интенсивности потоков информации и значимости данных, генерируемых в системе контроля технологических режимов, а также, применением экспертной системы на центральном уровне.

Теоретическая значимость работы. Показаны особенности протекания процессов в автоматизированной системе управления, имеющей множественные элементы регулирования, рабочий цикл которой может быть представлен в виде временного ряда с линейными коэффициентами, при коэффициентах корреляции выше 0,9.

Доказано, что распознавание внештатных режимов и аварийных ситуаций, обеспечивающее повышение эффективности работы городских водораспределительных систем достигается реализацией интегрированного совмещения способов управления на объектных уровнях в зависимости от сложности объектов управления, интенсивности потоков информации и значимости данных, генерируемых в системе контроля технологических режимов.

Практическая значимость полученных результатов. Предложенные методы, алгоритмы, аппаратно-программные средства и методологии организации водоснабжения больших жилых массивов с элементами автоматического управления энергоемким оборудованием позволяют обеспечить экономию электроэнергии до 20% и воды до 10%. Полученные результаты диссертационной работы и перечень предприятий их внедрения приведены ниже:

- усовершенствована существующая система водоснабжения города Донецка за счет использования созданной АСУ водоснабжением нового технического уровня (КП «Донецкгорводоканал»);

- усовершенствована система водоснабжения города за счет использования подсистемы моделирования режимов работы водораспределения, позволяющей

определить режимы функционирования системы в целом (КП «Харцызскгорводоканал»).

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач использовались: систематизация, обобщение и статистический анализ технологических данных; теория автоматического управления; схемотехнические методы построения информационно-аналитических систем; методы интеллектуального анализа данных, имитационные модели и методы анализа временных рядов; вычислительные и натурные эксперименты; управляемый промышленный эксперимент, а также практическая апробация результатов исследований в промышленных условиях.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Закономерности изменения технологических параметров и формирование эксплуатационных режимов систем водоснабжения, имеющих множественные элементы регулирования, которые обеспечивают поддержание заданного давления в диктующих точках сети.

2. Математические модели систем водоснабжения с множественными элементами регулирования, основанные на применении процесса декомпозиции систем водоснабжения на простые технологические подсистемы.

3. Алгоритмы адаптивного микропроцессорного управления режимами водоснабжения на объектных уровнях и оперативно-диспетчерского управления на центральном уровне.

Степень достоверности и апробация результатов. Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается корректностью формулировки математического описания задачи; использованием основополагающих положений теорий автоматического управления и регулирования, теории массового обслуживания, современных методов имитационного моделирования в компьютерной среде с применением специализированного программного обеспечения.

По формуле специальности и области исследований, содержанию научных положений и выводов, существу полученных результатов диссертационная работа соответствует паспорту специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление

технологическими процессами и производствами (по отраслям) (технические науки) в частности: п. 4 «Теоретические основы и методы математического моделирования организационно-технологических систем и комплексов, функциональных задач и объектов управления и их алгоритмизация», п. 5 «Теоретические основы, средства и методы промышленной технологии создания АСУ ТП, АСУП, АСТПП и др.», п.15 «Теоретические основы, методы и алгоритмы интеллектуализации решения прикладных задач при построении АСУ широкого назначения (АСУ ТП, АСУП, АСТПП и др.)» области исследований.

Результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на: заседаниях ученого Совета ДОННУ и его секций, заседаниях технических советов КП «Донецкгорводоканал», КП «Харцызкгорводоканал» и на различных конференциях.

Личный вклад соискателя. Автору принадлежит формулировка цели и задач исследования, обоснование закономерностей, полученных в работе, разработка моделей и алгоритмов управления. Основные положения и технические решения, предложенные при создании автоматизированной системы управления, разработаны автором самостоятельно. Экспериментальные и натурные исследования, промышленный эксперимент, обобщение результатов и формулировка выводов, а также внедрение результатов работы выполнены лично соискателем.

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 20 научных работах, в том числе: 4 работы в изданиях, входящих в перечень специализированных научных изданий, утвержденных МОН ДНР; 6 работ в изданиях, входящих в перечень специализированных научных изданий, утвержденных МОН Украины и 10 публикаций в материалах конференций.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, выводов, списка литературных источников, который включает 131 наименование, 3-х приложений. Работа содержит 60 рисунков и 16 таблиц. Общий объем работы составляет 185 страниц, приложения изложены дополнительно на 3 страницах.

РАЗДЕЛ 1

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Развитие городских систем водоснабжения как объектов мониторинга и управления технологическими режимами

Вода имеет важнейшее значение для здоровья и благополучия населения, она также необходима для ведения сельского хозяйства и осуществления других видов хозяйственной деятельности человека. Безопасный и устойчивый доступ к воде – в широком смысле слова обеспечение водной безопасности – составляет одно из главных условий человеческого развития [25,38,80].

По прогнозам ученых в течение следующих 40 лет численность городского населения Земли должна увеличиться вдвое, при этом потребление энергии муниципальными компаниями, обеспечивающими водоснабжение и водоотведение в городах, также возрастет как минимум в два раза. В настоящее время сети централизованного водоснабжения охватывают только половину городского населения Земли. В 2010 году среднегодовое количество возобновляемой воды в мире, приходящееся на одного человека, снизилось на 45 процентов по сравнению с 1970 годом. По мере того, как численность населения будет неуклонно возрастать, водные ресурсы Земли также будут неумолимо истощаться [38,45].

Во всем мире все это может привести к росту стоимости воды и повышению энергоемкости и капиталоемкости процесса водоснабжения. По прогнозам специалистов, общее мировое потребление электроэнергии в секторе водоснабжения и очистки сточных вод возрастет на 33% в течение следующих 20 лет. Известно, что до 7% всей энергии, потребляемой мировым сообществом, используется для подачи и очистки воды с целью обеспечения нужд городов и промышленности. Энергетическое потребление большинства водохозяйственных систем можно сократить, по крайней мере, на 25% за счет осуществления экономически выгодных мероприятий по повышению эффективности систем

водоснабжения [27]. При этом, как отмечается Альянсом за сбережение энергии [116], большинство городских водораспределительных и канализационных компаний во всем мире не принимают никаких мер по снижению потребления энергии. Часто руководство этих компаний не обладает необходимым запасом технических знаний и финансовых средств для того, чтобы реализовать многочисленные потенциальные возможности экономии энергии и воды.

Во многих случаях не хватает необходимого контрольно-измерительного оборудования для мониторинга показателей и характеристик работы систем. Практика показывает, что создание программно-технических управляющих комплексов и систем для реализации современных технологий энергосбережения требует значительных затрат средств, в связи с чем многие компании откладывают реализацию подобных проектов. В других случаях отсутствуют службы и группы энергоменеджмента в компаниях. Тенденция, когда низкая эффективность работы систем перекладывается в виде дополнительной финансовой нагрузки на потребителя, как ни странно, сегодня преобладает на многих предприятиях водоснабжения [116]. Тем не менее, в ряде крупных компаний мира существуют примеры эффективного менеджмента в области управления энергией и ресурсами. Установка контрольно-измерительного оборудования и систем мониторинга режимов работы позволяет снизить расходы на энергоснабжение на 20% только благодаря изменению привычных подходов и повышению уровня технического обслуживания [24,79,127, 116].

Мониторинг параметров режимов работы систем в течение их эксплуатации является превосходным способом оценки выполнения мероприятий, направленных на повышение эффективности использования энергии [27]. Основной первоначальной задачей системы мониторинга крупной компании является внедрение технологий контроля и анализа данных в масштабе всего предприятия, включая средства измерения и передачи данных, компьютеры, программные расчетные модули, базы данных и генераторы отчетов. После создания инфраструктуры системы мониторинга можно переходить к анализу

данных и выполнению работ по целенаправленной оптимизации систем водоснабжения [48,72, 131].

Ряд специалистов отмечают, что современные системы мониторинга являются составной частью общей системы энергоменеджмента многих крупных предприятий, обеспечивающих водоснабжение городов и населенных пунктов, так как позволяют вывести работу предприятий на качественно новый технологический уровень [27,58,67,76,92,116,128,129]. Важным фактором энергосбережения является своевременная реконструкция объектов водоснабжения на фоне изменившихся условий водопотребления, а также предвидение изменений, которые могут возникнуть в ближайшем будущем в связи с меняющимися региональными условиями.

Предприятия водоснабжения городов ДНР имеют развитые сети водоподачи и водораспределения, а также канализационные сети. Комплексы водоснабжения состоят из технологических объектов, сооружений и распределительных сетей, связанных единым технологическим процессом забора, водоподготовки, контроля качества, транспортирования и подачи питьевой воды. Обычно подача воды осуществляется по магистральным трубопроводам из нескольких источников (водохранилищ, поверхностных и артезианских водозаборов).

Водопроводные узлы обеспечивают подачу подготовленной питьевой воды населению и другим потребителям, в свою очередь, подкачивающие насосные станции обеспечивают подачу воды группам объектов водопотребления.

Обычно на предприятиях республики используется двух-четырёх ступенчатые системы очистки воды.

В мировой практике при водоснабжении городов вода из источников, которая забирается для водоснабжения населения, в зависимости от качества может подлежать глубокой 10÷14-ступенчатой очистке (например, система водоснабжения г. Амстердам). Уже сейчас во многих городах Европы, Америки и Азии используются 7–9 ступеней очистки поверхностных вод. Для артезианских вод применяют до четырех ступеней очистки.

При мониторинге качества воды количество контролируемых параметров составляет от шестидесяти до восьмидесяти. В перспективе развития лабораторного контроля предполагается увеличение количества контролируемых параметров с 80 до 114. Такое количество параметров контролируется в странах ЕС. При этом расширяется перечень контролируемых бактериологических параметров и широко используются методы биотестирования качества воды.

Современные автоматизированные системы мониторинга и управления технологическими режимами на предприятиях водоснабжения и водоотведения городов представляют собой достаточно сложные информационно-управляющие комплексы. Требования к системам мониторинга, автоматизации и диспетчеризации для данных предприятий приведены в нормативном документе [74]. Обычно на таких предприятиях технологические объекты оснащаются датчиками, исполнительными механизмами и другой аппаратурой, которые позволяют реализовать следующий комплекс функций контроля и управления режимами работы технологических систем:

- сбор и первичная обработка технологической информации, которая поступает от датчиков и первичных преобразователей;
- контроль основных параметров технологических процессов и расчет режимов работы оборудования;
- визуализация и регистрация информации о технологических процессах;
- прогнозирование энергопотребления в технологических системах и водораспределения в сетях водоснабжения;
- дистанционное управление процессами из центрального диспетчерского пункта, а также автоматическое управление исполнительными механизмами на локальном уровне на основе оперативного анализа собранной технологической информации;
- выявление, регистрация и сигнализация в процессе возникновения нерасчетных эксплуатационных режимов;
- распознавание и регистрация аварийных ситуаций.

Сегодня развитие систем водоснабжения как объектов мониторинга и управления технологическими режимами идет по следующим направлениям:

- контрольно-измерительные средства и сети мониторинга;
- базовые критерии, системы показателей и технологии для оценки работы объектов;
- методики аудита режимов работы объектов применительно к автоматизированным системам контроля и управления;
- системы анализа данных и оперативного принятия решений;
- системы управления режимами работы объектов.

Качество данных в значительной степени зависит от количества, качества и расположения контрольно-измерительного оборудования. Развитие контрольной сети системы мониторинга представляет собой важную задачу, однако после первого этапа создания такой сети всегда закономерно возникает проблема оптимизации измерительной сети. Создание избыточной измерительной сети мониторинга достаточно дорогостоящее мероприятие, как по капитальным, так и по эксплуатационным затратам. Даже минимальная сеть требует создания эксплуатационной группы, обеспечивающей работу оборудования.

Главной задачей при развитии контрольно-измерительной системы является создание сети первичных и вторичных измерительных приборов для контроля давления, расхода воды и электроэнергии. Такая сеть должна обеспечивать измерение количества энергии и воды, поступающей в систему, а также расчет количества воды, доставляемой потребителям. В наилучшем варианте контрольно-измерительная система должна охватывать всю водохозяйственную систему города вплоть до мест потребления воды и расходов энергии, однако при этом она должна быть оптимальной по стоимостным параметрам и эксплуатационным затратам.

Существует несколько типов контрольно-измерительных приборов (КИП) и средств технологического мониторинга, позволяющих производить однотипные измерения. Поэтому в практической деятельности остро стоит задача выбора оборудования, наиболее подходящего для мониторинга технологических

режимов. Автоматизированные системы мониторинга контролируют расходы воды на водопроводных узлах и подкачивающих станциях, уровни воды в резервуарах, давление в сетях, потребление электроэнергии, режимы использования насосного оборудования и запорной аппаратуры, параметры качества воды и т.д.

Важной задачей является правильное определение участков, на которых проводятся измерения. Измерение расходов и давлений воды, а также энергопотребления электродвигателей, как правило, производится вблизи главных насосов водопроводных узлов (ВУ), повысительных насосных станций (ПНС) и канализационных насосных станций (КНС) с целью оценки их эффективности. На локальном уровне может потребоваться дальнейший анализ характеристик главных насосов для определения оптимальных рабочих режимов. Это возможно путем применения микропроцессорной техники, использования данных измерений и выполнения расчетов по известным методикам. Контроль давления и расхода на участках сети необходим в узловых точках для анализа эффективности работы водопроводной сети, оценки утечек воды, определения количества воды, подаваемой потребителям, оценки оптимальности совместных режимов работы сетей и насосов и т.д. Средства мониторинга и КИП являются основой АСУ ТП любого предприятия.

Существенным при оценке эффективности систем является разработка комплекса показателей и индикаторов, характеризующих водо- и энергопотребление на технологических объектах и предприятии в целом, которые могут быть использованы при анализе работы объектов в автоматизированном режиме. Выбор и оценка значений таких показателей позволяют определить базовые уровни для последующего их сравнения с показателями, которые имеют аналогичные объекты или данными паспортов на оборудование, а также контроля количественного изменения их значений с течением времени. Контроль показателей использования воды и энергии позволяет получить важную информацию относительно эффективности работы всей системы водоснабжения и реализации конкретных мероприятий по энергосбережению. Показатели

эффективности технологических процессов производства должны включаться в регламенты работы оборудования, паспорта оборудования и участков инженерных сетей. Это является важным инструментом при разработке программ развития предприятия и поэтапной модернизации производства [127].

В таблице 1.1 на примере КП «Донецкводоканал» приведен краткий перечень, используемых показателей и индикаторов для оценки эффективности работы систем водоснабжения и водоотведения, а также контроля эффективности водо- и энергосбережения.

Частью процесса определения комплекса мероприятий по снижению эксплуатационных расходов является проведение на технологических объектах энергоаудита. Имеется ряд руководств по аудиту в системах водоснабжения и канализации [58,67,92,115,116,128,129], однако в них недостаточно информации о методах аудита применительно к системам водоснабжения, оборудованным автоматизированными системами контроля и управления.

После внедрения системы мониторинга практически сразу возникает проблема разработки эффективной методики использования получаемых данных. Для определения энергопотребления обычно проводят текущие расчеты, выполняют сравнение полученных данных с паспортными данными производителей оборудования, показателями и индикаторами, принятыми в качестве стандартов предприятия, а также сравнивают данные с наиболее эффективными показателями, достигнутыми на данный момент в отрасли [86].

Средства анализа данных, такие как номограммы и характеристики насосов, программные средства оптимизации и гидродинамических расчетов, относятся к первичным средствам анализа информации. Эти средства позволяют проводить технический анализ эффективности ВУ, ПНС и КНС, а также отдельных частей системы водоснабжения. Примерами подобных средств являются программные продукты вида [4,10,59,96,130].

Таблица 1.1. – Показатели и индикаторы для контроля эффективности работы систем водоснабжения и водоотведения

№	Показатели и индикаторы	Единица измерения	Базовые значения
1	2	3	4
Для всего предприятия в целом			
1.	Производственная мощность системы водоснабжения	млн. м ³ /сут	1 136
2.	Подано воды в сеть водоснабжения	млн. м ³	137,0
3.	Отпущено воды всем потребителям	млн. м ³	74,4
4.	Бытовое водопотребление в расчете на душу населения	м ³ / год·чел	48,5
5.	Уровень потерь воды в водопроводных сетях	%	45,7
6.	Уровень потерь воды в канализационных сетях	%	--
7.	Доля проб, не отвечающих нормам качества питьевой воды, в общем количестве проб	%	0
8.	Установленная пропускная способность канализации (очистных сооружений)	тыс. м ³ /сут	475,0
11.	Доля загрязненных сточных вод в общем объеме стоков	%	89
12.	Ежегодный объем потребления электроэнергии	млн. кВт·ч	79,7
13.	Энергоемкость системы (отношение между годовым потреблением электроэнергии и годовым объемом подачи воды)	кВт·ч/ м ³	0,59
Для ВУ, ПНС и КНС			
14.	Ежегодный объем потребления электроэнергии насосами	млн. кВт·ч/ мес.	
	– ВУ		1,644
	– ПНС		0,245
	- КНС		4,472

Продолжение таблицы 1.1

15.	Фактический к.п.д насосных систем – Двигатели – Насосы	%	90 – 95 70 - 80
Для участков водопроводных и канализационных сетей			
16.	Уровень потерь воды в водопроводных сетях	%	28,9
17.	Доля устаревших и аварийных сетей	%	80

Система компьютерного моделирования водопроводных сетей Mike Net [96] представляет собой программный комплекс, разработанный компанией DHI Water & Environment. Эта система включает интегрированную моделирующую среду для городских систем водоснабжения и водоотведения с использованием ГИС и содержит три инструмента в одном пакете: ПО для моделирования работы сетей водоснабжения и водоотведения на основе GIS; интегрированный пакет моделирования стоков с помощью SWMM5; пакет моделирования сетей водоснабжения с помощью Epanet [96].

Известными системами с развитыми функциями мониторинга и управления являются АСУ ТП водоснабжения на базе программного комплекса Trace Mode 5.10 ОАО «Уралмонтажавтоматика» [4] и Единая АС диспетчерского контроля и управления городским хозяйством г. Москвы. Следует отметить разработки компании Ensys Technologies и некоторых западных университетов, а также Департамента энергетики США [10,59,125,130].

Программные средства существенным образом автоматизируют технические расчеты и позволяют в процессе накопления информации разработать стандарты предприятий и периодически обновлять информацию в паспортах оборудования и технологических регламентах.

Общеизвестно наличие двух подходов к построению сложных автоматизированных систем управления:

- ориентация, в первую очередь, на применение новейших технических и технологических достижений, стремление повысить степень автоматизации и функциональные возможности управления системой без участия человека;

- ориентация, в первую очередь, на управление системой человеком-оператором (диспетчером).

Изучение материалов, связанных с созданием эффективных и надежных систем диспетчерского управления, показывает, что в системах управления режимами работы объектов водоснабжения применяются оба подхода. Много материалов и исследований по промышленной автоматизации посвящено также конкуренции двух направлений – применению промышленных компьютеров или промышленных контроллеров. В состав центральной и локальной диспетчерской обычно входит промышленный компьютер, который обеспечивает поддержку работы диспетчера. На базе промышленных контроллеров чаще всего организуется нижний уровень системы управления, где осуществляется обработка информации и управление оборудованием в режиме жесткого реального времени. Контроллер сбора данных принимает информацию с датчиков, переключателей и преобразователей. Контроллер поддержания давления рабочими насосами управляет частотным преобразователем. Контроллер управления задвижками управляет электроприводами задвижек. Промышленный компьютер и контроллеры во многих АСУ ТП объединены в сеть с помощью промышленной шины и работают под управлением операционной системы реального времени.

В настоящее время операторы настраивают оборудование по данным мониторинга чаще всего интуитивно или вообще не вмешиваются в работу системы. Однако ситуация начинает меняться. В США последние годы активно внедряются на предприятиях водоснабжения системы SCADA. Имеются данные о высокой эффективности внедряемых систем [13]. В Европе и России внедрение SCADA-систем на предприятиях водоснабжения и водоотведения получило широкое развитие с 2002 года [1,2,26,34, 35,77,95,98,118,120].

Таким образом, при развитии городских систем водоснабжения как объектов мониторинга и управления технологическими режимами наиболее широко применяются следующие технические решения:

- внедрение приводов с регулируемой скоростью вращения электродвигателей и микропроцессорным управлением на ВУ, ПНС и КНС, установка автоматических редуцирующих клапанов;
- внедрение программных систем управления работой насосов и контроля к.п.д., автоматическое управление временем работы оборудования;
- применение систем ПИД-регулирования движения потоков;
- использование программно-технологических систем управления процессами аэрации;
- применение автоматических систем контроля утечек и звуковых корреляторов утечек для снижения потерь воды;
- внедрение автоматизированных систем энергоменеджмента на крупных объектах потребления воды (школы, больницы и т.д.);
- создание корпоративных информационных систем и центральных баз данных компаний, объединяющих технологическую и коммерческую информацию;
- внедрение программно-управляющих систем SCADA.

Из приведенного выше следует, что при совершенствовании АСУ ТП предприятий водоснабжения городов особое внимание следует уделять системам анализа данных и оперативного принятия решений, а также системам управления режимами работы технологических объектов.

1.2 Автоматизированные системы мониторинга и управления водоснабжением и водоотведением

Современное развитие муниципального коммунального хозяйства больших городов предусматривает ускоренную реконструкцию объектов водоснабжения. Практика работы крупных предприятий водоснабжения показывает, что

наилучший результат может быть получен при использовании комплексного подхода, который включает применение средств автоматизации на всех уровнях системы водоснабжения, в том числе диспетчерского управления и учета энергоресурсов. Обычно внедрение комплексных систем автоматизации на базе современных программно-технических комплексов осуществляется предприятиями водоснабжения поэтапно с постепенным увеличением сложности систем [1,2,3,9,26,31,32,34,65,77,78,93,35,95,120]. АСУ ТП водоснабжения и водоотведения призваны обеспечивать оптимальное ведение технологических процессов. Развитие АСУ ТП предприятий водного хозяйства осуществляется в следующих направлениях водоснабжения и водоотведения, в которых технические решения для автоматизированных систем имеют свои особенности [74,87]:

- системы управления технологическими процессами водозабора (водозаборные скважины, насосные станции 1-го подъема, ВУ);
- системы управления технологическими процессами реагентного хозяйства и водоотведения;
- системы автоматизации и диспетчеризации объектов водораспределения и водоснабжения (насосные станции 2-го и последующих подъемов, подкачивающие насосные станции, групповые потребители, локальные объекты, водопроводные сети);
- системы автоматизации и диспетчеризации объектов водоотведения (канализационные насосные станции, водовыпуски).

Основные цели данных автоматизированных систем направлены на обеспечение надежного водоснабжения с минимальными затратами энергии, экономию электроэнергии и воды, ведение оперативного мониторинга работы оборудования и управление технологическими процессами, увеличение сроков службы и снижение затрат на ремонты и т.д. Исходя из этого, комплексные АСУ ТП предприятий водного хозяйства функционально реализуют различные виды мониторинга и управления технологическими процессами на объектах автоматизации, которые включают системы водозабора, водоподготовки,

распределения и снабжения водой потребителей, а также водоотведения и очистки стоков. Проектирование АСУ ТП водоснабжения и водоотведения осуществляется с учетом требований нормативных документов [5, 49,50,51,52,53,54, 74, 100,105].

Обычно при создании комплексных автоматизированных систем реализуется концепция объектно-территориального подхода с реализацией методов непрерывного технологического мониторинга, а также локально-автоматического или дистанционно-диспетчерского управления процессами. Чаще всего системы имеют два-три иерархических уровня с несколькими подсистемами, например, локальной системой мониторинга объектов, подсистемой связи с объектами, диспетчерской системой управления и т.д. Подсистемы создаются с учетом принципов многофункциональности и информационного взаимодействия, структурной многоуровневости и иерархичности, обеспечения систематичности и непрерывности наблюдений, а также оперативности управления.

Принцип унификации при создании систем обеспечивается путем использования серийно выпускаемых технических средств, типизации проектных решений и применения единых подходов при внедрении информационных и коммуникационных технологий, которые распространены на рынке. Также изначально при проектировании современных систем учитывается принцип поэтапного развития АСУ ТП предприятия. Оптимальное развитие систем обеспечивается возможностью увеличения объектов мониторинга и управления, увеличением перечня контролируемых показателей, расширением структуры и функций системы, а также за счет модернизации программного и технического обеспечения.

Анализ АСУ ТП крупных предприятий водного хозяйства [1,3,9,26,27, 31,32, 35, 78,82, 93,95,107] показал, что архитектура систем чаще всего имеет три уровня и включает: центральный диспетчерский пункт; средний уровень, который может быть привязан к ряду крупных объектов; и нижний уровень, на котором обеспечивается мониторинг и управление на локальных объектах.

На центральном уровне обычно реализуются функции контроля показателей работы наиболее важного оборудования и параметров технологических процессов, визуализация, архивирование и документирование информации, учет расхода ресурсов по всем объектам и статистическое обобщение данных, координация управления подсистемами, расчет технико-экономических показателей, прогнозирование хода технологических процессов и определение их рациональных режимов.

На среднем уровне реализуются функции мониторинга показателей работы оборудования и параметров технологических процессов группы объектов, архивирование и документирование информации, учет расхода ресурсов, управление оборудованием, функции оперативного учета параметров, некоторые прогнозные, диагностические и расчетные задачи.

На нижнем уровне реализуются функции диагностики оборудования и мониторинга технологических процессов локального объекта, программно-логического управления агрегатами и запорной аппаратурой, противоаварийной защиты и блокировки, учета потребляемых ресурсов, передачи необходимой информации на верхние уровни и т.д. Для решения этих задач используется обычно программируемый контроллер, который реализует систему автоматизации локального объекта в автоматическом или дистанционном режиме управления и организует передачу данных по телефонной или оптоволоконной линии, по радиоканалу или GSM-каналу.

На рисунке 1.1 приведена типовая схема технического решения автоматизации современного предприятия водного хозяйства [82].

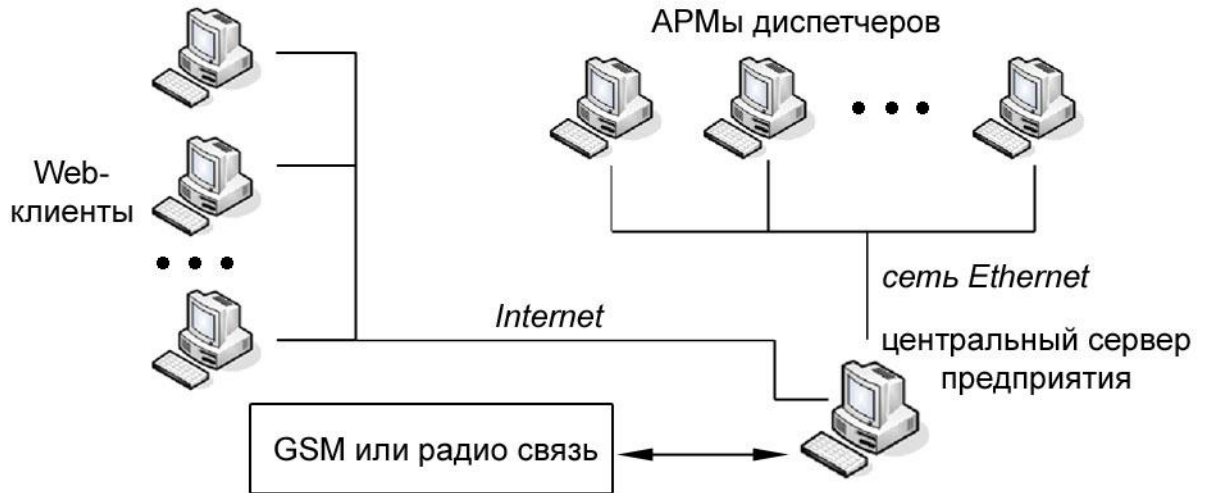
На каждом уровне обычно используются подсистемы визуализации различного уровня сложности в виде человеко-машинных интерфейсов, позволяющие отображать технологическую информацию на мнемосхемах или графиках, получать видеoinформацию реальных ситуаций, просматривать архивы и протоколы событий, реализовывать функции управления объектами и защиты от неправильных действий операторов, формировать и выдавать отчеты и т.д.

Диспетчерские подсистемы верхнего и среднего уровня оборудуются локальной сетью с компьютерами, на которых устанавливаются SCADA-системы, а также устройствами связи с объектами. На некоторых предприятиях водного хозяйства начинают применяться WebSCADA-системы, обладающие возможностями Web-технологий [50,51,52].

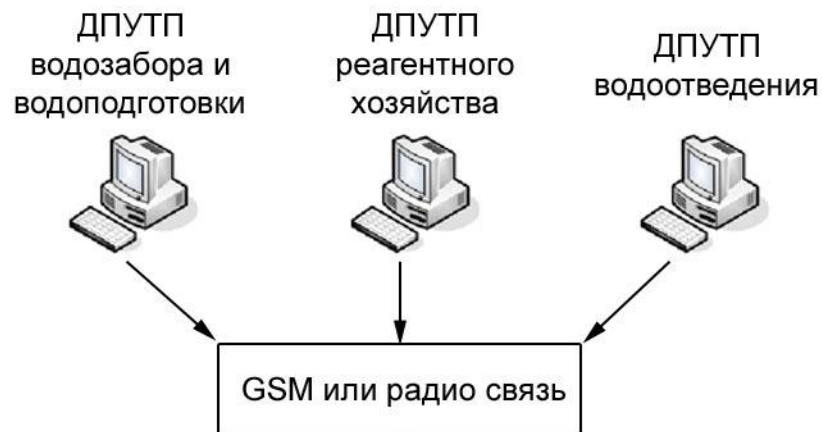
Водозаборы (водозаборные подземные скважины, насосные станции 1-го подъема, крупные водопроводные узлы) предприятий водного хозяйства представляют собой сложные инженерно-технические сооружения, рассредоточено размещенные на значительной территории.

Города с населением более 1 млн. жителей могут иметь до 5 – 10 водопроводных станций, забирающих воду из рек, каналов и крупных подземных скважин. Автоматизированные системы управления работой подобными объектами являются развитыми программно-техническими комплексами, цели которых направлены на надежное водоснабжение, создание единой системы мониторинга и управления объектами, минимизацию потребления энергии и воды, обеспечение надежной работы технологических систем и увеличение сроков эксплуатации насосного оборудования и запорной арматуры. Основные функции АСУ ТП водозаборов связаны с созданием централизованной системы мониторинга объектов и технологических процессов, прогнозированием хода технологических процессов и определение их рациональных режимов, представлением операторам оперативной и ретроспективной информации, обнаружением нештатных и аварийных ситуаций и сигнализацией о их возникновении, диагностикой оборудования, управлением режимами работы системы, учетом параметров водозабора и энергопотребления насосов, формированием отчетных документов и т.д. [35, 74,77,95,120]. Структура АСУ ТП водозаборов предприятий водного хозяйства приведена на рисунке 1.2.

Центральный диспетчерский уровень



Средний уровень



Нижний уровень



Рисунок 1.1 – Типовое решение автоматизации предприятия водного хозяйства



Рисунок 1.2 – Структура АСУ ТП типовой водозаборной станции

Технические средства на основе которых комплектуется АСУ ТП – это средства мониторинга и измерений (расходомеры, погружные уровнемеры, датчики различных параметров и т.д.), средства управления (частотные преобразователи, приводы задвижек, системы регулирования и т.д.), коммуникационные устройства в случае использования устройств с различными протоколами, пульт диспетчера на основе широкоформатных экранов, микропроцессорные средства и ПЭВМ, радиомодемы и GSM-модемы, OPC-

сервера и т.д. Программные средства АСУ ТП включают системы диспетчерского управления и сбора данных SCADA, АРМы диспетчера, базы данных и средства динамической визуализации данных, различное специальное ПО

Достаточно сложными инженерно-техническими сооружениями являются также системы реагентного хозяйства и водоотведения предприятий водного хозяйства. Система реагентного хозяйства и свойственные ей технологические процессы, обеспечивают подготовку питьевой воды и контроль ее качества. Реагентное хозяйство включает расходные баки коагулянта и поликриламида, дозировочные насосы и насосы перекачки, воздуходувки, растворные баки, баки хранилища, системы хлорирования или озонирования воды и т.д.

Система водоотведения предприятия водного хозяйства обеспечивает полную биологическую очистку сточных вод. Обычно станции очистки сточных вод используют стандартную технологическую схему: удаление примесей на механических решетках, песколовках и в первичных отстойниках, удаление биологических компонентов в аэротенках и вторичных отстойниках, обеззараживание воды и т.д. Технологическая схема обработки осадка включает: илоуплотнители и ленточные сгустители для избыточного активного ила, метантенки, уплотнители и сгустители сброженного осадка, фильтр-прессы для обезвоживания осадка с применением флокулянтов, иловые площадки и полигоны депонирования.

Целью создания АСУ ТП реагентного хозяйства является обеспечение надежной очистки сточных вод. Функции АСУ связаны с измерением и контролем технологических параметров и параметров сточных вод, представлением операторам оперативной информации, архивированием истории изменения параметров, управлением режимами работы системы, реализацией расчетных задач по очистке сточных вод, формированием отчетных документов, диагностикой оборудования и т.д. [2,9,26,31,65,74, 78].

Технические средства, используемые АСУ ТП реагентного хозяйства и станций водоотведения, включают средства мониторинга и измерений (датчики параметров воды и растворов, расходомеры, уровнемеры, датчики различных

технологических параметров и т.д.), средства управления (регулируемые насосы и дозаторы, системы поддержания температуры нагнетания воздуха, приводы задвижек и т.д.), пульта диспетчера и оперативного персонала, микропроцессорные средства и ПЭВМ и т.д. Программные средства АСУ ТП – это системы SCADA, АРМы диспетчера, системы реального времени контроллеров, специальное ПО для расчетных задач и моделирования процессов и объектов, экспертные системы [113].

Обычно развитые АСУ ТП реагентного хозяйства и станций водоотведения могут обрабатывать до 5000 – 6000 каналов физических сигналов и выдавать управляющие сигналы по каналам управления, количество которых может достигать до 1000.

Системы автоматизации и диспетчеризации объектов водораспределения и водоснабжения, а также водоотведения предназначены для повышения эффективности работы подкачивающих и канализационных насосных станций. Структура объекта управления в этом случае приведена на рисунке 1.3.

Предприятия водного хозяйства крупных городов могут иметь более сотни ПНС и несколько десятков КНС, которые обычно разбросаны по всей территории города. Функции АСУ ТП данных объектов направлены на мониторинг режимных параметров технологических процессов, управление технологическим оборудованием, насосами и задвижками, обеспечение противоаварийных защит и блокировок, автоматическое управление оборудованием с целью снижения потребления энергии, передачу данных мониторинга и информации о потоках событий на диспетчерские пункты различных уровней, диагностику элементов оборудования и выдачу сообщений об нештатных ситуациях, учет параметров расхода воды и энергопотребления насосов, выдачу отчетных документов и сообщений, а также решение локальных прогнозных задач хода технологических процессов и определения их рациональных режимов и т.д.

Технические средства, на основе которых komponуются подсистемы данного уровня – это программно-логические контроллеры и шкафы для их размещения, средства мониторинга и измерений (расходомеры, счетчики электроэнергии,

датчики параметров и т.д.), средства управления (частотные преобразователи, приводы задвижек и т.д.), радиомодемы и GSM-модемы, средства ввода-вывода информации, ИБП и т.д. Программные средства подсистемы – это АРМ оператора, драйверы устройств, специальное ПО [87].

В связи с территориально распределенной системой инженерных сетей и объектов на многих предприятиях водного хозяйства применяются также геоинформационные технологии, которые являются средством, создающим основу для оперативного управления системами водоснабжения и канализации на основе использования тематических карт разной направленности. Основой для развития ГИС на предприятии обычно служит информация, полученная при выполнении работ по инвентаризации сетей, которая представляется в виде тематических карт-слоев: водопроводные участки, колодцы, задвижки, скважины, бойлерные, домовые вводы и т.д.

Обычно ГИС позволяют развить информационную технологию сбора и актуализации пространственных данных по структуре водопроводных сетей и повысить оперативность диспетчерского управления [46,55,103]. При этом возможно решение следующих задач: мониторинг состояния систем подачи и распределения воды и контроль режимов их работы; учет потерь воды в сетях; выполнение гидравлического моделирования сетей; подготовка тематических карт и прогнозирование хода технологических процессов и т.д.

В качестве инструмента для реализации ГИС-технологий предприятиях водного хозяйства часто используют ArcView 9, MapInfo и ИнГео. Используется также ПО для ГИС-моделирования водопроводных сетей – ActiveFRAMME компании Intergraph Corporation (США, www.intergraph.com), ArcFM Water компании Miner&Miner (США, www.miner.com), ACAD компании AUTODESK (США, www.autodesk.com) и др. Обычно ГИС входят составными частями в информационно-аналитические или технологические системы предприятий.

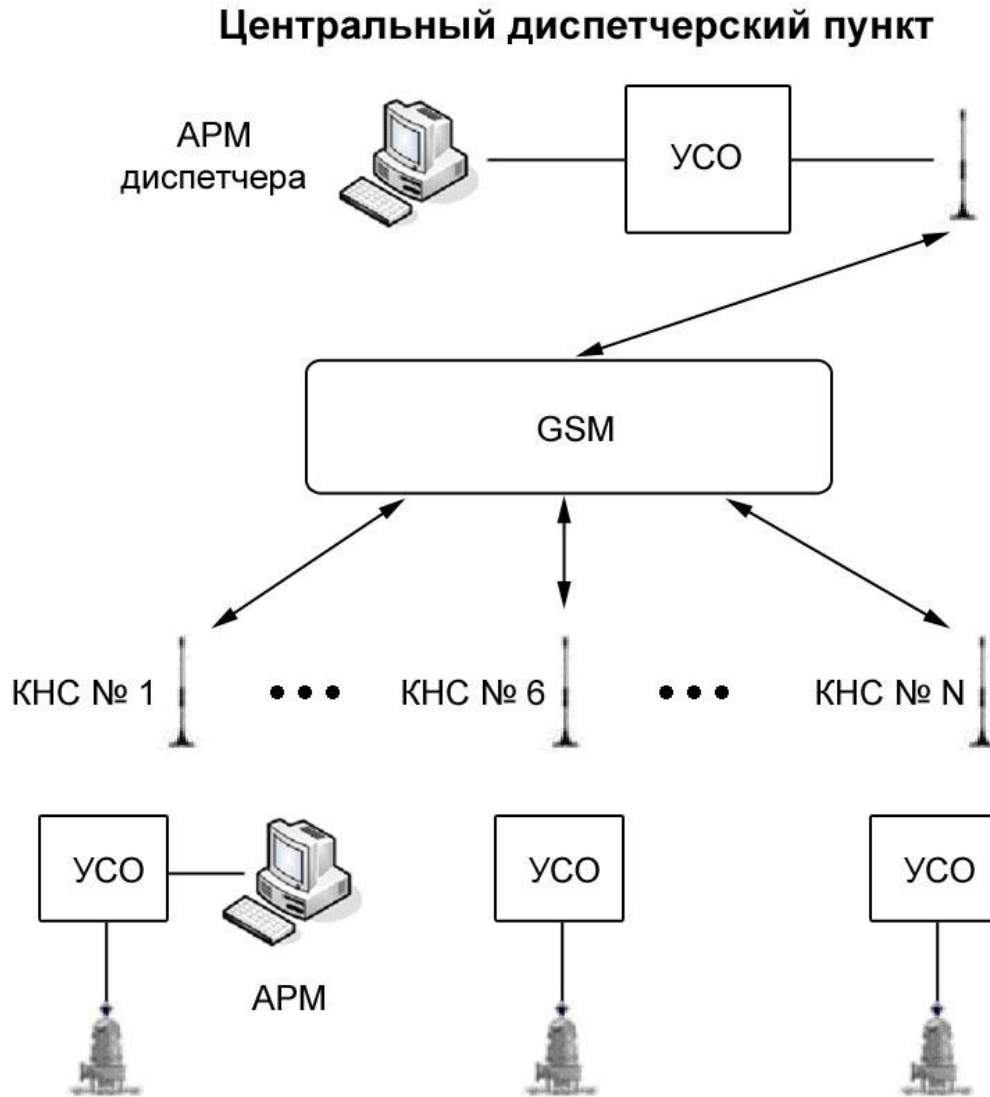


Рисунок 1.3 – Структура автоматизированной системы ПНС или КНС

Ряд крупных предприятий водного хозяйства кардинально усовершенствуют принципы управления путем внедрения систем менеджмента качества [53], которые основываются на процессном подходе, когда в рамках организации осуществляется автоматизация и информационная поддержка нескольких производственных процессов, например, технологических и деловых процессов. Основная цель процессного подхода на базе корпоративных информационных систем (КИС) заключается в обеспечении единства управления предприятием и

освобождении персонала и руководства от значительного количества рутинных операций, связанных с оперативным управлением.

Однако, как показывает практика, даже комплексное внедрение КИС деловых процессов не может заменить АСУ ТП предприятий, для которых характерна специфическая функциональность свойственная предприятию. Поэтому требуются решения, которые позволяют использовать возможности интеграции ИС различной направленности. В таких случаях КИС деловых процессов выполняют роль центрального шлюза для представления технологической информации пользователям на предприятии за счет применения Web-технологий. В настоящее время на предприятиях водного хозяйства стран бывшего СССР распространены следующие КИС: «Галактика», «Парус», «1С: Предприятие», КИС «АС+» и т.д.

В будущем возможно слияние систем АСУ ТП и КИС в единую автоматизированную систему управления работой предприятий. Подобные системы сравнительно не давно стали появляться на рынке информационных технологий. На предприятиях водоснабжения и водоотведения имеются примеры внедрения таких систем на базе расширения функций корпоративных информационных систем [42,70,103]. Создание и развитие АСУ ТП и КИС в настоящее время регламентируется следующими документами [44,46, 49,53,55,74,75, 97, 101,102].

1.3 Методы анализа данных и моделирования процессов при мониторинге систем водоснабжения

В информационном плане современные АСУ ТП водоснабжения городов позволяют очень быстро сформировать большие базы технологических данных по объектам мониторинга и управления. Буквально одновременно с началом создания таких баз данных, возникает проблема изучения, собираемой информации. В настоящее время методы анализа данных и моделирования технологических процессов связаны в основном с решением задач оптимального

управления на объектах водоподачи или сетях водоснабжения. В этом случае сбор и обработка информации проводится по следующим направлениям:

- измерение, контроль и учет текущих значений параметров путем циклического опроса датчиков и приборов с фильтрацией случайных выбросов и контролем допустимых пределов параметров при одновременной сигнализации возникновения нерасчетных режимов работы оборудования;
- измерение и контроль текущих значений параметров в случае изменения режима работы оборудования с одновременным микропроцессорным управлением, обеспечивающим заданные режимы;
- непрерывный мониторинг датчиков и приборов контроля с одновременным микропроцессорным управлением и расчетом интегральных показателей, позволяющих минимизировать потребление энергии при установленных графиках подачи воды.

Обычно сбор и обработка информации и микропроцессорное управление происходят автоматически на локальном уровне, при этом вся информация параллельно передается в базы данных на центральном и среднем уровне с выдачей сообщений диспетчеру для принятия управляющих решений.

При решении комплекса задач оперативного учета параметров и расчета интегральных показателей обычно используется метод прямого счета. Возможны случаи, когда отдельные задачи могут решаться методом нелинейного программирования.

Критериями при решении данного комплекса задач могут выступать рабочие параметры, общее потребление энергии объектом или себестоимость воды, которая подается потребителям, при заданных ограничительных условиях хода технологического процесса или графиках подачи воды. При этом оптимальные режимы работы ПНС и КНС определяются на основе моделирования совместных режимов работы насосных агрегатов и водопроводной или канализационной сети. Данная задача существенно осложнена наличием случайных воздействий, связанных со стохастическим характером изменения водопотребления во времени в достаточно широких пределах. На рисунке 1.4 приведен типовой график

изменения давления воды, подаваемой потребителям. В этом случае при эксплуатационных режимах, когда характерен случайный характер внешних воздействий, часто наблюдается несоответствие характеристик центробежных насосов и трубопроводов. Обычно для увеличения подачи воды в сеть в дневное время на ПНС увеличивается напор. Характеристика сети представляет собой квадратичную функцию зависимости необходимого напора от расхода воды, которая монотонно возрастает с ростом расхода воды. В свою очередь характеристика насосного агрегата монотонно убывает с ростом расхода. Поэтому в периоды низкого водопотребления система водоснабжения работает с избыточным напором, что ведет к затратам энергии, утечкам и непроизводительным расходам воды.

Оптимальным является режим работы системы, при котором развиваемый насосом напор равен напору, требуемому для подачи воды в сеть. Чаще всего рабочие параметры насосных агрегатов приводятся в соответствие с режимом работы водопроводной сети путем автоматического регулирования напорной задвижкой или изменением частоты вращения насоса. При регулировании рабочих параметров напорной задвижкой рабочая точка перемещается по характеристике насоса, т.к. изменяется функция характеристики сети. В свою очередь, при изменении частоты вращения насоса рабочая точка перемещается по характеристике сети, т.к. в этом случае изменяется уже характеристика насоса. Очевидно, что при втором методе регулирования развиваемый насосом напор меньше, чем в первом. Следовательно, и расход электроэнергии на подачу одного и того же расхода воды меньше. Частотно-регулируемый электропривод позволяет поддерживать подобные оптимальные режимы работы ПНС и КНС.

Математические модели характеристик сети и насосных агрегатов представляют обычно в виде полиномов, где коэффициенты определяются на основе статистической обработки полученных данных о режимах работы системы с ретроспективой в одну – три недели [64,65, 66].

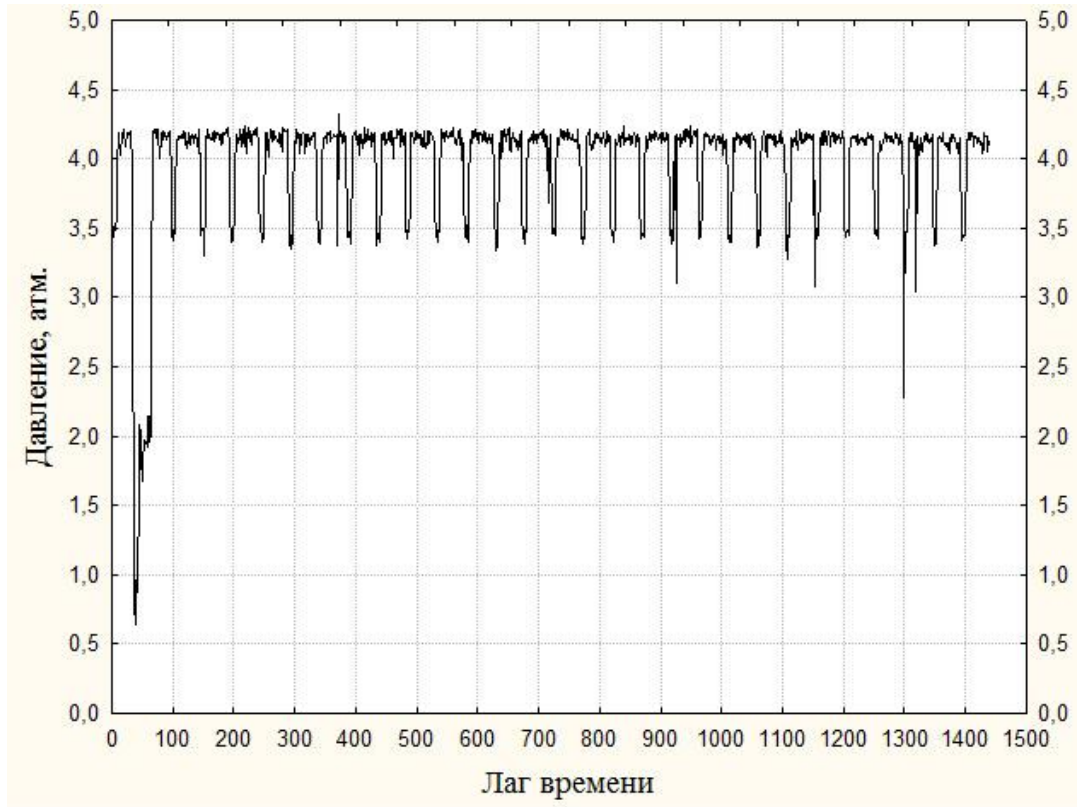


Рисунок 1.4 – Временной ряд давления воды на выходе ПНС Квартал 196. Один лаг временного ряда – 30 минут

Задачи прогнозирования потребления воды по участкам сети решаются методами прогнозирования временных рядов: построением моделей АРСС, методами анализа распределенных лагов, способами сезонной декомпозиции, методом «пределных циклов», спектральным анализом Фурье, классическими методами операционных преобразований, например, быстрым преобразованием Фурье и т.д. [8,21,23,29,39,57].

Достаточно сложной является задача распределения воды от ВУ по нескольким технологическим линиям при обеспечении минимальной технологической себестоимости подачи и обработки воды и заданных технологических ограничениях для каждой линии. Подобный класс задач в системах АСУ ТП решается методом проекции градиента [30]. Задачи оптимального управления группами потребителей и водных источников решаются обычно методом логического анализа [6,7].

Взаимосвязь задач АСУ ТП и способы их решения определяются общим алгоритмом функционирования системы, который отражает принятую на предприятии стратегию оперативного управления. Оперативное планирование режимов технологических процессов может проводится несколько раз в сутки, а также при резком изменении водопотребления или условий работы сетей и насосов. На рисунке 1.5 показан общий алгоритм функционирования АСУ ТП водоснабжения и взаимосвязь комплекса задач. Обычно алгоритмы решения задач АСУ ТП водоснабжения и водоотведения выбираются достаточно простыми. При их функционировании используются операции осреднения, линеаризации и интегрирования величин, контролируемых при мониторинге технологических процессов, а также сравнение параметров с предельно допустимыми значениями и т.д.

Последнее время при анализе информации, собираемой АСУ ТП в процессе мониторинга объектов водоподачи и водоснабжения, начинают применяться методы интеллектуального анализа данных [55,56,105,110,114,119,123,124]. Создание баз данных, содержащих информацию о режимах работы городских систем водоснабжения, закономерно ставит вопрос об использовании данных методов для изучения постоянно растущих объемов информации. Можно предположить, что в ближайшем будущем количество работ, посвященных применению методов интеллектуального анализа данных в данной области, существенно возрастет. Сегодня уже видны возможности создания прогнозных и экспертных систем, использующих подобные подходы и позволяющих осуществлять оптимальное управление насосами, запорной аппаратурой, частотными преобразователями и технологическими режимами и т.д. [64,68].

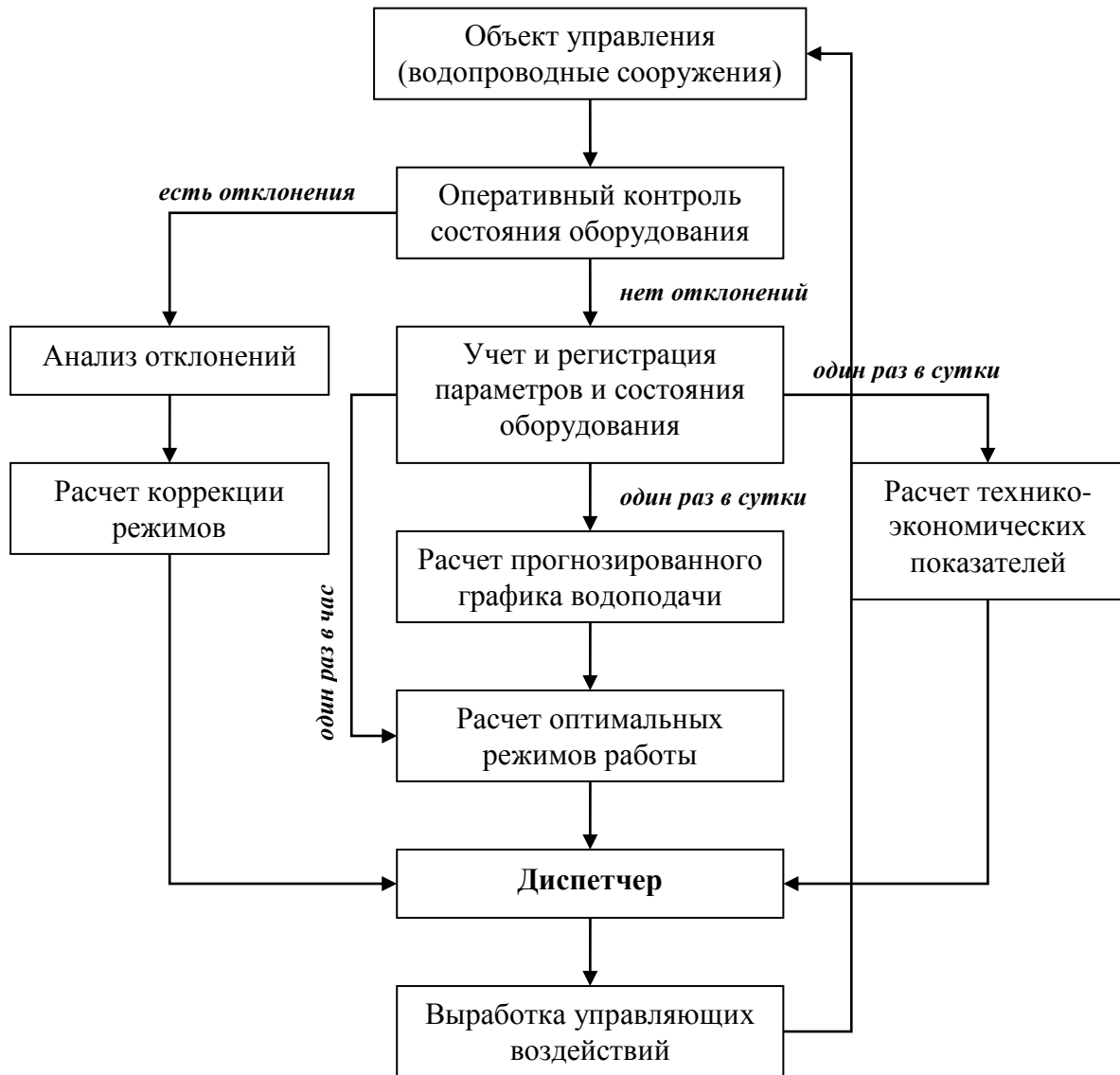


Рисунок 1.5 – Алгоритм централизованного оперативного управления технологическими процессами водоснабжения

К методам интеллектуального анализа данных (Data mining) относится классификация, ассоциативный анализ, кластеризация, регрессионные деревья, метод аналогий, эволюционное программирование, прогнозирование, алгоритмы ограниченного перебора, многомерная визуализация и т.д. [12,13,41,126]. Data mining является мультидисциплинарной областью, возникшей и развивающейся в рамках информатики на базе достижений прикладной статистики, методов распознавания образов и искусственного интеллекта, теории баз данных и современных достижений всей вычислительной науки. Отсюда и вытекает обилие

методов и алгоритмов, реализованных в различных продуктах интеллектуального анализа данных. В соответствии с известным определением, интеллектуальный анализ данных – это процесс обнаружения в сырых данных ранее неизвестных, нетривиальных, практически полезных и доступных интерпретации знаний, необходимых для принятия решений в различных сферах человеческого общества [120,121,122]. Если сбор данных ведется на объектах, имеющих пространственное расположение, параметры которых меняются во времени, то в этом случае используют методы пространственно-временного интеллектуального анализа данных [127]. Методы Data mining предоставляют отработанные алгоритмические подходы к формулировке гипотез и их проверке, а также эффективные средства работы с массивами данных. Это позволяет получить не известные ранее закономерности и корреляционные зависимости, которые могут отражать связь между элементами информации, представленной в базе данных.

Наиболее широкое распространение данные методы получили в климатологии [28,47,112]. Эта область, где методы Data mining бурно развиваются и совершенствуются, после чего отработанные алгоритмы получают распространение в других областях науки и техники.

Для анализа данных собранных АСУ ТП предприятий водоснабжения и водоотведения могут использоваться методы прогнозирования временных рядов, регрессионные деревья, эволюционное программирование, алгоритмы ограниченного перебора, многомерная визуализация и т.д. Установление закономерностей в базах, данных содержащих информацию о работе оборудования и водопроводных сетей позволит разработать эффективные алгоритмы управления технологическими процессами [111].

Следует отметить, что объединение средств мониторинга с большими базами статистических данных и инструментами Data mining является перспективным путем развития информационно-аналитических и экспертных систем, обеспечивающих поддержку принятия решений на предприятиях водоснабжения и водоотведения.

1.4 Выводы и задачи исследования

По результатам анализа состояния вопроса можно сделать следующие выводы.

1) Последние десятилетия во всем мире наблюдается рост стоимости воды и повышение энергоемкости и капиталоемкости процесса водоснабжения. По прогнозам специалистов, в течение следующих 20 лет общее мировое потребление электроэнергии в секторе водоснабжения и очистки сточных вод возрастет на 33%. Известно, что до 7% всей энергии, потребляемой мировым сообществом, используется для подачи и очистки воды с целью обеспечения нужд городов и промышленности. При этом энергетическое потребление большинства водохозяйственных систем можно сократить, по крайней мере, на 25% за счет осуществления экономически выгодных мероприятий по повышению эффективности систем водоснабжения. Большую роль среди подобных мероприятий занимает разработка и внедрение современных средств АСУ ТП предприятий водоснабжения и водоотведения. Все это подтверждает актуальность исследований данной диссертационной работы.

2) Анализ и обзор литературных источников в изучаемой предметной области показал, что развитие АСУ ТП предприятий водоснабжения и водоотведения идет по пути совершенствования технических средств мониторинга и передачи данных, а также модернизации локальных систем автоматического управления работой оборудования на объектах. Диспетчеризация технологических процессов в основном осуществляется по пути сбора и представления данных и сигнализации о возникновении нерасчетных режимов, при этом диспетчерское управление объектами направлено на корректировку допустимых параметров технологических процессов. На удаленных локальных объектах преобладает микропроцессорное управление режимами работы оборудования и водораспределения.

3) Измерение, контроль и учет текущих значений параметров производится способом периодического циклического опроса датчиков и приборов или

способом целенаправленного опроса в случае изменения режима работы оборудования. В этом случае регулирование работы оборудования осуществляется преимущественно локально на основе микропроцессорных систем, позволяющих автоматизировано обеспечить поддержание заданных режимных показателей. Непрерывный мониторинг датчиков и приборов контроля с одновременным микропроцессорным управлением и расчетом интегральных показателей, позволяющих оптимизировать режимные параметры, осуществляется редко, т.к. это требует применения специальных дорогостоящих программных систем.

4) В АСУ ТП предприятий водоснабжения и водоотведения обычно применяются достаточно простые алгоритмы решения задач водораспределения и выбора оптимальных режимов работы оборудования. Данные алгоритмы требуют использования значительного количества исходных данных и отличаются низкой достоверностью прогнозных результатов, т.к. ошибки, вносимые с большим количеством исходных данных, изначально достаточно велики. Экспертные системы, а также информационно-аналитические системы, которые предусматривают использование методов моделирования и идентификации моделей работы оборудования и водораспределительных систем, применяются редко.

5) В связи с накоплением предприятиями водоснабжения и водоотведения больших объемов технологической информации, последнее время при ее анализе, начинают применяться методы интеллектуального анализа данных. Для анализа данных, собранных АСУ ТП предприятий, могут использоваться методы прогнозирования временных рядов, регрессионные деревья, эволюционное программирование, алгоритмы ограниченного перебора, многомерная визуализация и т.д. Развитие этих методов является актуальной задачей в области совершенствования АСУ ТП, т.к. установление закономерностей в базах данных, содержащих информацию о режимах работы оборудования и водопроводных сетей, позволит разработать эффективные алгоритмы управления технологическими процессами.

Данный факт становится важным на фоне того, что закономерности формирования технологических режимов в системах водоснабжения с развитыми элементами автоматического регулирования имеют существенные отличия по сравнению системами водоснабжения без регулирования.

Таким образом, объединение средств мониторинга с большими базами статистических данных и инструментами Data mining является перспективным путем развития информационно-аналитических и экспертных систем, обеспечивающих поддержку принятия решений на предприятиях водоснабжения и водоотведения.

Выполненный анализ состояния вопроса позволил сформулировать следующие задачи исследования:

- осуществить сбор и систематизацию данных о функционировании городских водораспределительных систем, установить закономерности изменения технологических параметров и формирования эксплуатационных режимов систем водоснабжения с множественными элементами регулирования;
- выполнить формальное представление городских систем водоснабжения как единого объекта мониторинга и управления на основе синтеза различных моделей, а также разработать информационные модели для описания режимов их работы;
- разработать методологию мониторинга режимов работы и управления процессами водоснабжения городов с использованием методов интеллектуального анализа данных;
- разработать комплекс технических и программных средств, направленных на повышение эффективности и экономичности работы городских водораспределительных систем.

РАЗДЕЛ 2

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ОБЪЕКТОВ МОНИТОРИНГА СИСТЕМЫ ВОДОСНАБЖЕНИЯ ГОРОДА

2.1 Характеристика объекта автоматизации и методика проведения исследований

Одной из наиболее актуальных проблем, которые стоят перед коммунальным хозяйством ДНР, является проблема снижения энергопотребления систем водоснабжения и водоотведения. Так, например, потребление электроэнергии предприятиями водоснабжения в промышленных городах составляет от 5 до 30 МВт в год. Все это требует внедрения целого комплекса мероприятий по энергосбережению.

Во многих городах республики существует острая проблема дефицита качественных пресных вод для хозяйственно-питьевого водоснабжения населения, сельского хозяйства и перерабатывающей промышленности. В целом обеспеченность водой одного жителя республики составляет 180 м³ в год. Бытовое потребление воды в расчете на одного человека уменьшилось с 135 м³ в 1990 году до 58 м³ в 2008 году [36,37].

По городу Донецку забор воды из близлежащих природных водных объектов осуществляется в количестве 61 млн. м³. Всего с учетом воды, поставляемой по каналу «Северский Донец – Донбасс», потребление воды в городе достигает 113,2 млн. м³. За последние девять лет эта цифра снизилась на 22%. В свою очередь водоотведение по городу достигает 147,5 млн. м³. Донецк использует на хозяйственно-бытовые цели свежую воду в количестве 78,8 м³/чел/ год. [36].

Прогнозы показывают, что к 2020 году потребление воды по городу Донецку может снизиться еще на 15 ÷ 20 % и составить 90 ÷ 100 млн. м³. После 2020 года уровень потребления воды должен стабилизироваться на указанном значении.

В городе Донецке работы по созданию эффективной системы мониторинга городской сети водоподачи и водораспределения ведутся с 2004 года. Сейчас

водоснабжение города обеспечивается предприятием КП «Донецкгорводоканал». Объем подачи воды для города составляет около 510 тыс. м³/сут. На балансе КП «Донецкгорводоканал» находятся:

- 9 водопроводных узлов (ВУ), общей проектной мощностью 1136 м³/сут;
- 125 подкачивающих насосных станций (ПНС);
- 3114 км водопроводных сетей;
- 1400 км канализационных сетей;
- Донецкие очистительные сооружения, производительностью более 500 тыс. м³/сут;
- 17 канализационных насосных станций (КНС).

Водопроводные узлы, ПНС и КНС относятся к числу наиболее энергоемких технологических объектов в коммунальном хозяйстве. Годовое потребление электроэнергии предприятием КП «Донецкгорводоканал» достигает 80 млн. кВт·час при общей мощности оборудования 11175 кВт [88].

Для разработки опытно-промышленной системы мониторинга был модернизирован и оснащен средствами контроля и автоматизации промышленный объект водоснабжения, охватывающий целый район города. В качестве такого объекта был принят Киевский район города Донецка.

В настоящее время Киевский район занимает территорию равную 34,31 км², на которой проживает 139,2 тыс. чел. Система водоснабжения Киевского района включает Северный водопроводный узел, 25 ПНС и 310 км водопроводной сети. На данном объекте выполнялась отработка новых технических решений и проведение промышленных экспериментов в области мониторинга и управления технологическими процессами водоснабжения.

Одновременно с модернизацией основного оборудования велось создание автоматизированной системы мониторинга. В этот период основные технологические объекты были оснащены датчиками и измерительной аппаратурой, которые позволяли реализовать следующий комплекс функций контроля режимов работы технологических систем водоснабжения:

- сбор и первичная обработка технологической информации, которая

поступает от датчиков и первичных преобразователей;

- передача данных на диспетчерский пункт, накопление информации и контроль основных параметров технологических процессов;
- оперативный анализ собранной технологической информации, визуализация и регистрация данных о технологических процессах.

Система мониторинга водоснабжением города состоит из следующих подсистем:

- система сбора и передачи информации с удаленных объектов;
- программный комплекс мониторинга технологической информации, включающий базы данных и геоинформационную систему (ГИС).

Важным этапом развития системы мониторинга КП «Донецкгорводоканал» явилось внедрение системы сбора и передачи информации с удаленных объектов с использованием средств мониторинга работы оборудования, радиоканала и GSM-модемов. На текущий момент данная система охватывает 138 объектов: все водопроводные узлы, 86% ПНС и целый ряд контрольных точек (КТ) на водопроводных сетях. В процессе мониторинга контролируются расход воды и давление по напорным трубопроводам, уровни воды в приемных резервуарах, потребляемый насосными агрегатами ток, потребленная объектами электроэнергия и др.

В качестве источников информации используются следующие контрольно-измерительные приборы:

- ультразвуковые измерители расхода питьевой воды и сточных вод;
- водомеры с импульсным выходом;
- датчики абсолютного и избыточного давления;
- ультразвуковые и гидростатические датчики уровня;
- счетчики электроэнергии.

Как правило, существует несколько типов контрольно-измерительных приборов и средств технологического мониторинга, позволяющих производить однотипные измерения. При этом в практической деятельности перед компаниями остро стоит задача выбора оборудования, наиболее подходящего для

выполнения определенных видов мониторинга технологических режимов. В таблице 2.1 приведен краткий перечень, используемых в КП «Донецкгорводоканал», КИП и средств измерений. Принятые к эксплуатации марки КИП являются результатом практического опыта длительной эксплуатации различных типов оборудования [88].

Программный комплекс мониторинга технологических режимов выполняет все функции, связанные с накоплением, хранением, анализом и представлением данных. Вся информация о технологических параметрах по радиоканалу или с помощью GSM-модемов передается на центральный диспетчерский пункт (ЦДП) – в базу данных системы мониторинга. Пользуясь запросами к серверной части и к базе данных, диспетчер ЦДП и диспетчера районных служб водоканализационных систем (ВКС) могут контролировать в реальном времени обстановку на водопроводных и канализационных сетях, водопроводных узлах и канализационных насосных станциях города. Программный комплекс предоставляет пользователю удобный интерфейс для работы и отображает информацию в понятной и удобной форме. Структура и описание программного обеспечения системы технологического мониторинга приведены в разделе 2.3.

Для достижения поставленной в работе цели и решения сформулированных задач была принята следующая методика проведения исследований и работы с данными мониторинга технологических систем.

Идея исследований заключалась в том, чтобы в течении нескольких лет основные технические решения, связанные с созданием системы мониторинга технологическими режимами работы водопроводных сетей и насосных станций, отработать на примере действующей опытно-промышленной системы городского водоснабжения. Это позволило бы создать АСУ ТП с множественными элементами мониторинга. Дистанционный сбор показателей работы оборудования с удаленных объектов дал бы возможность накопить обширные базы данных технологической информации, которые, в свою очередь, бы позволили применить современные методы поиска закономерностей в динамически меняющихся данных.

Таблица 2.1. – Измеряемые параметры технологических процессов в системах водоснабжения КП «Донецкгорводоканал»

Параметры	Типовые КИП	Принятые марки КИП
Расход воды	Дифференциальные КИП Счетчики расхода Расходомеры объемного типа	Дифманометры ДМ-3583 Ультразвуковые накладные «Акрон-01» Ультразвуковые врезные «Sonokit»
Давление воды	Манометры Сильфоны Диаграммы Пьезорезистивные датчики	Тензодатчики ИД-01
Мощность электродвигателей	Амперметры Вольтметры Измерители коэффициента мощности	Анализатор сети DIRIS A40
Частоты вращения насосов для оценки КПД	Стробоскопические источники света	Тахометр ИП-114
Объемы накопленной воды	Датчики уровня	Ультразвуковые ЭХО-Р-01
Напорные характеристики	Измерители перепадов давления	Автономные измерители давления
Номинальные показатели для оценки оптимального КПД	Комплекс КИП	«Акрон-01» Тензодатчики ИД-01 Анализатор сети DIRIS A40

Методика работы с данными мониторинга включала в себя комплекс аналитических и статистических методов, методов формализации объектов мониторинга и управления технологическими режимами систем водоснабжения,

методов сбора, накопления и представления данных, а также средств интеллектуального анализа данных.

Создание опытно-промышленного участка действующей территориально-распределенной системы водоснабжения города с множественными элементами мониторинга и регулирования технологическими объектами осуществлялось в Киевском районе города Донецка. В течении нескольких лет при участии автора была проведена модернизация водопроводного узла и подкачивающих станций с целью внедрения средств автоматизации. Это позволило создать опытно-промышленный участок системы водоснабжения для отработки основных технических и программных решений направленных на полную автоматизацию и контроль технологических процессов водоснабжения.

Автоматический сбор информации и разработанное программное обеспечение для накопления и представления данных позволили сформировать базы данных технологической информации, которые достаточно полно характеризуют работу объектов системы водоснабжения района.

На основе собранной информации проводилась формализация объектов мониторинга и управления технологическими режимами систем водоснабжения, для чего использовались методы статистической обработки данных и методы интеллектуального анализа данных. При установлении закономерностей в базе данных технологической информации использовались методы анализа временных рядов, алгоритмы перебора и сортировки данных, методы визуализации информации, а также статистические методы [23]. С этой целью применялось различное программное обеспечение для формирования, представления и интерпретации исходных данных.

Выполненный анализ режимов работы водопроводных сетей и насосного оборудования позволил провести декомпозицию территориально-распределенной системы водоснабжения на более простые объекты: водопроводные узлы, подкачивающие насосные станции и отдельные участки водопроводных сетей, где расположены контрольные точки системы мониторинга. Декомпозиция проводилась таким образом, чтобы с одной стороны, существовала полная

информация о режимах работы объекта, которая собирается автоматизированными средствами технологического мониторинга, а, с другой стороны, имелась бы возможность формализации объектов виде аналитических гидравлических моделей сосредоточенными параметрами на основе обработки информации, накопленной в технологической базе данных. Это позволило получить информационные модели объектов водораспределения и водоподачи, на основе которых в дальнейшем отрабатывались алгоритмы автоматического управления объектами городской системы водоснабжения.

Принятая методическая схема проведения исследований и работы с данными мониторинга позволила решить поставленные в диссертационной работе задачи.

2.2 Реализация технологической системы мониторинга режимов водоснабжения Киевского района г. Донецка

Система мониторинга и управления технологическими режимами водоснабжения Киевского района является трехуровневой с подсистемами мониторинга и управления, работающими по принципу обратной связи. Верхний уровень системы создан в виде центрального диспетчерского пункта (ЦДП). Схема ЦДП приведена на рисунке 2.1. В состав ЦДП входит:

- подсистема сбора, формирования и передачи информационных и управляющих сигналов (управляющий компьютер с мнемосхемами узлов, ПНС и районов);
- подсистема анализа и принятия решений (компьютер аналитического отдела с программами ГИС и системой гидравлического моделирования);
- подсистема контроля (46-ти дюймовые настенные мониторы для отображения информации).

Информация о технологических параметрах со всех контрольных точек, ПНС и водопроводных узлов по радиоканалу передается на ЦДП. Основная информация выводится на мнемосхемы для анализа. Диспетчер ведет анализ эффективности работы сети в текущий момент времени. С помощью программ

ГИС и гидравлического моделирования принимаются решения об изменении режимов работы оборудования в случае необходимости. Это реализуется с помощью подсистемы формирования и передачи управляющих сигналов.

Средний уровень системы представлен локальными диспетчерскими на водопроводных узлах и ПНС. В состав любой локальной диспетчерской входит промышленный компьютер, который обеспечивает поддержку работы машинистов оборудования.

Нижний уровень системы организован на базе промышленных контроллеров, где осуществляется сбор и обработка информации и управление оборудованием в режиме реального времени. Контроллер сбора данных принимает информацию с датчиков, переключателей и преобразователей. Контроллер поддержания давления управляет частотным преобразователем электродвигателя насоса. Контроллер управления задвижками управляет электроприводами задвижек. Промышленный компьютер и контроллеры объединены в локальную сеть с помощью индустриальной шины и работают под управлением операционной системы реального времени.

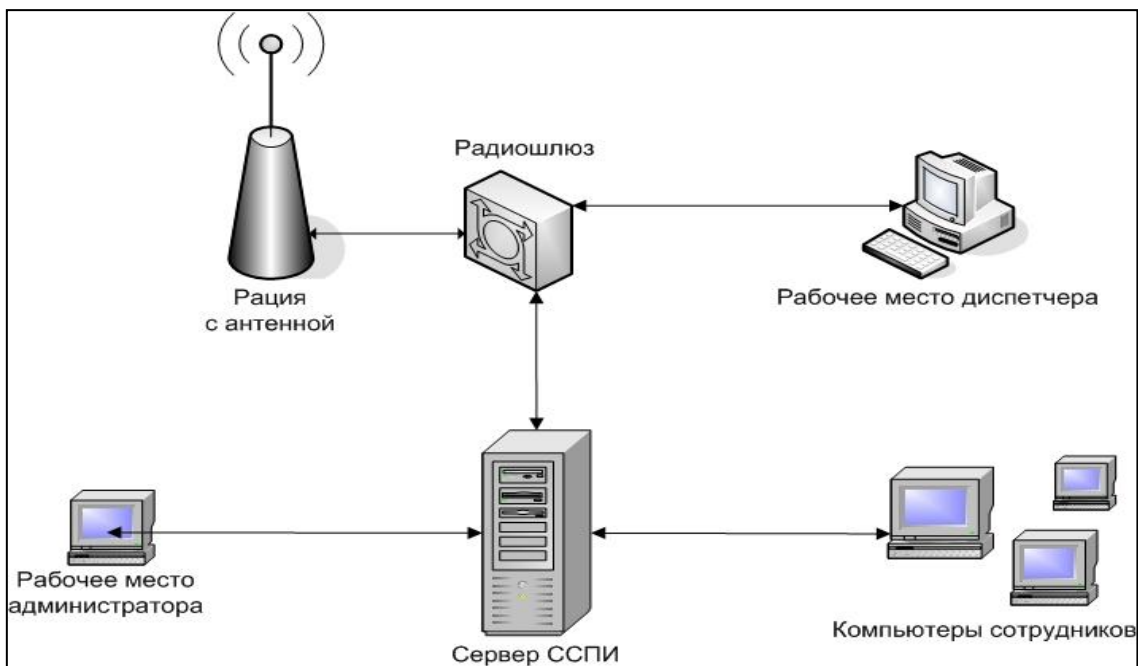


Рисунок 2.1 - Схема центрального диспетчерского пункта Киевского района г. Донецка

Схема технического обеспечения АСУ ТП на водопроводных узлах и ПНС дана на рисунке 2.2. В свою очередь, на рисунке 2.3 представлен опытно-промышленный участок системы водоснабжения Киевского района г.Донецка, на котором осуществляется сбор данных о технологических режимах работы системы в соответствии с информацией, приведенной в таблице 2.2 [88].

В настоящий момент времени диспетчер на ЦДП может дистанционно получить информацию о работе всех объектов, а также управлять задвижкой на приходе и частотным преобразователем на ВУ, частотными преобразователями на большинстве ПНС. Ведется расширение набора функций мониторинга и управления по целому ряду технологических объектов КП «Донецкгорводоканал».

На водопроводных узлах ПНС, КНС и водораспределительных сетях в точках регулирования технологических процессов реализуются различные процедуры сбора данных и алгоритмы автоматизированного управления.

На водопроводных узлах регулирование мощными насосами (400 – 700 кВт) осуществляется с помощью микропроцессорного управления частотными преобразователями, позволяющими изменять скорость вращения электродвигателей. Управление насосами осуществляется таким образом, чтобы в процессе мониторинга параметров на гребенке перед задвижками, подающими воду по разным технологическим линиям, поддерживалось заданное давление.

В случае, если на водопроводных узлах имеются накопительные резервуары, то в зависимости от уровня воды, который контролируется, осуществляется микропроцессорное управление автоматической задвижкой на входе в резервуар. С этой целью в качестве приборов контроля применяются ультразвуковые датчики уровня.

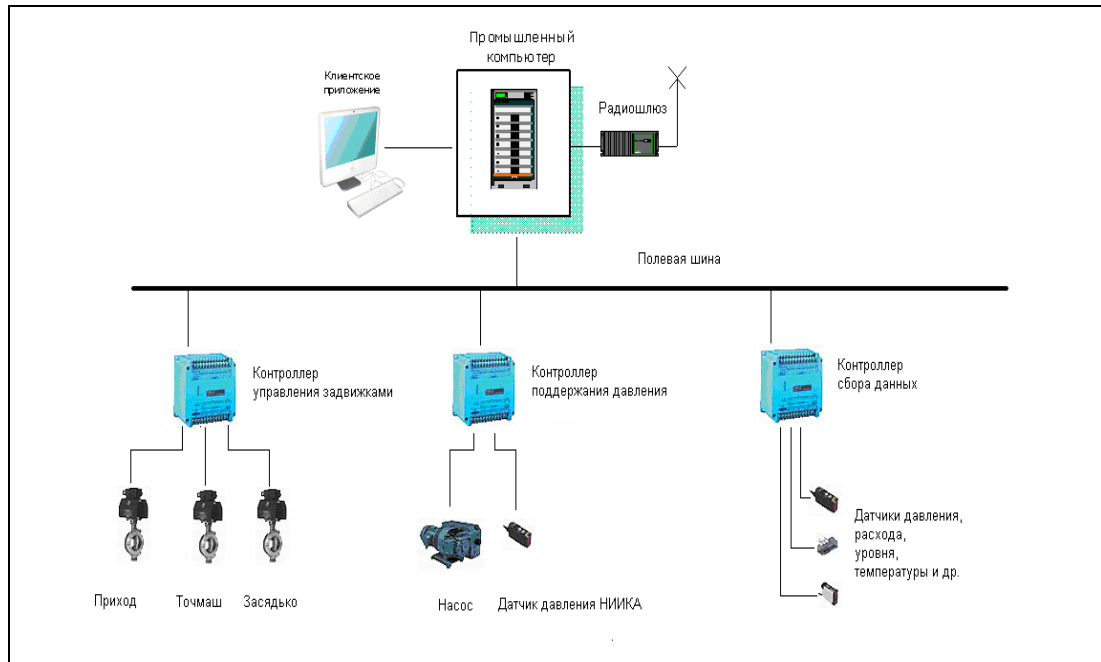


Рисунок 2.2 – Схема АСУ ТП на водопроводных узлах и ПНС системы водоснабжения Киевского района г. Донецка

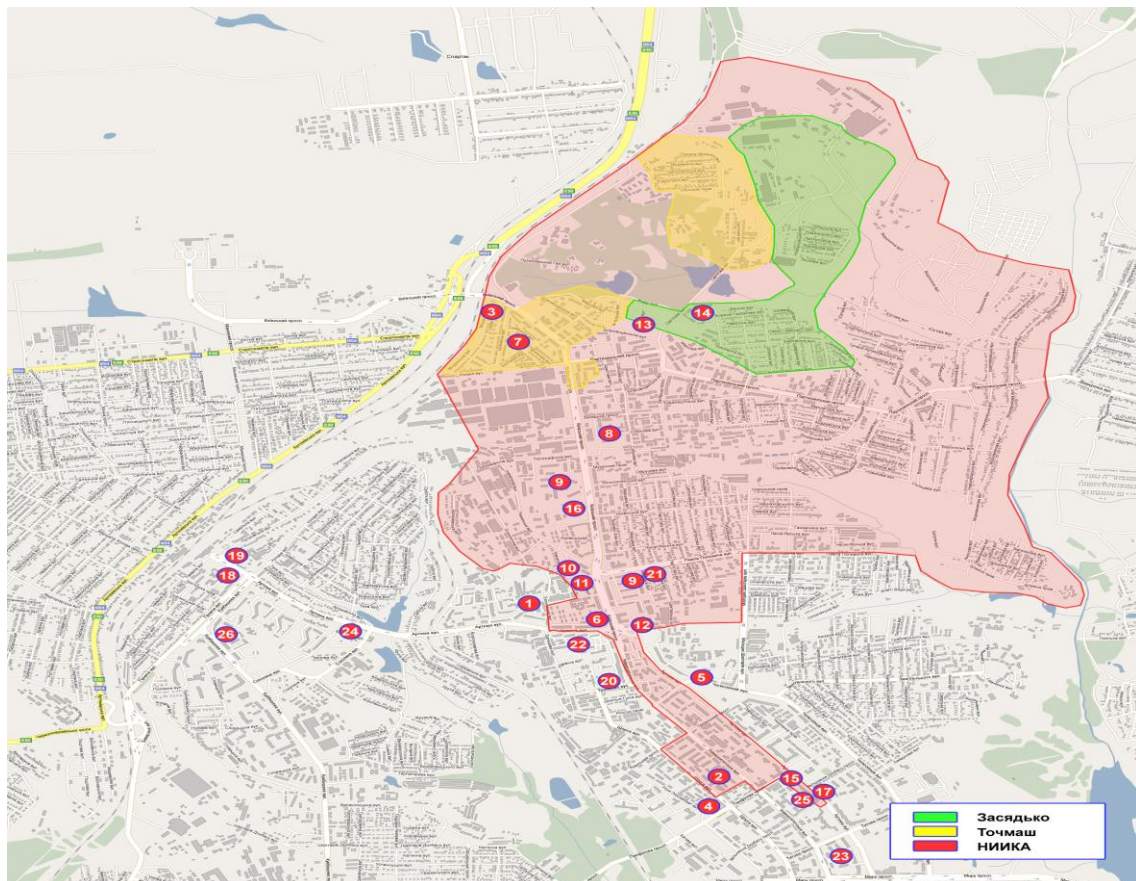


Рисунок 2.3. – Опытно-промышленный участок водоснабжения Киевского района города Донецка. 8 – объект системы мониторинга технологических параметров (таблица 2.2)

Таблица 2.2. – Измеряемые параметры технологических процессов в системе водоснабжения Киевского района города Донецка

№	Наименование объекта	Адрес	КИП
1	2	3	4
Водопроводный узел Северный			
1	ПНС Квартал 234	ул. Артема, 181б	Два ДД, Акрон, АПЧВН
2	ПНС Квартал 735	ул. Университетская, 94а	Два ДД, Акрон, АПЧВН
3	ПНС ул. Стратонавтов	ул. Стратонавтов, 121	Два ДД, Акрон, АПЧВН
4	ПНС Квартал 203	ул. Р. Люксембург, 103а	Два ДД, Акрон, АПЧВН
5	ПНС м-р Ветковский	ул. Челюскинцев, 275	Два ДД, Акрон, АПЧВН
6	ПНС кв. «Синтетика»	пр. Киевский, 2а	Два ДД, Акрон, АПЧВН
7	КТ Башня Точмаш	Точмаш	Один ДД
8	ПНС Квартал 268	пр. Киевский, 55г	Два ДД, Акрон, АПЧВН
9	ПНС Квартал 238	пр. Киевский, 5	Два ДД, Акрон, АПЧВН
10	ПНС Киевский-4	пр. Киевский, 4	Два ДД, Акрон, АПЧВН
11	ПНС Киевский-2	пр. Киевский, 36г	Два ДД, Акрон, АПЧВН
12	ПНС кв. «Дончанка»	ул. Университетская, 105	Два ДД, Акрон, АПЧВН
13	КТ Квартал 287	ул. Чапаева, 8а	Один ДД
14	ПНС Взлетный	ул. Взлетная, 11	Два ДД
14 1	ПНС Домостроитель	ул. Листопрокатчиков, 13	Два ДД
15	ПНС Квартал 198а	ул. Челюскинцев, 212	Два ДД, Акрон, АПЧВН
16	ПНС м-р Киевский-1	пр. Киевский, 36г	Два ДД, Акрон, АПЧВН
17	ПНС ТП 198	ул. Артема, 151а	Два ДД
18	КТ УЖД, Квартал 438	ул. Артема, 282а	Два ДД
19	КТ Артема 279	ул. Артема, 279	Один ДД
20	ПНС Шахтерский-1	ул. Тренева, 1	Два ДД, Акрон, АПЧВН
21	ПНС Квартал 628	ул. Поповича, 37а	Один ДД

Продолжение таблицы 2.2

1	2	3	4
Водопроводный узел Центральный			
22	ПНС Шахтерский-2	ул. Артема, 154а	Два ДД, Акрон, АПЧВН
23	ПНС м-р Артема 102б	ул. Артема, 102б	Два ДД, Акрон, АПЧВН
24	ПНС Привокзальный-2	ул. Артема, 198а	Два ДД, Акрон, АПЧВН
25	ПНС Квартал 196	ул. Артема, 108а	Два ДД, Акрон, АПЧВН
26	ПНС Привокзальный-1	ул. Куйбышева, 246б	Два ДД, Акрон, АПЧВН

Регулирование работой насосами ПНС осуществляется с помощью микропроцессорного управления частотой вращения электродвигателя. Алгоритм контроля и управления обеспечивает постоянное заданное давление воды в подающей линии ПНС. Давление в линии подачи для каждой ПНС устанавливается в зависимости от условий подачи воды на объекты водопотребления. В этом случае используются два датчика давления (вход, выход), датчик расхода воды (Акрон) и микропроцессорный регулятор частоты вращения насоса (АПЧВН).

Регулирование работой насосами КНС также осуществляется с помощью микропроцессорного управления частотой вращения электродвигателя, однако скорость вращения рабочего колеса насоса обеспечивается из условия поддержания постоянного уровня сточных вод в приемном резервуаре КНС, который размещен перед насосом.

Техническое обеспечение автоматизированной системы управления в этом случае включает ультразвуковые датчики уровня ЭХО-Р-01 и микропроцессорный регулятор частоты вращения насоса (АПЧВН).

В целом ряде контрольных точек водораспределительной сети при мониторинге ведется контроль давления воды с помощью тензодатчиков ИД-01 и расхода воды с помощью датчиков расхода Акрон (Таблица 2.2). На некоторых контрольных точках имеется также возможность управления задвижками, которые автоматически поддерживают заданное давление на выходящих линиях подачи

воды. Техническое обеспечение АСУ задвижками – тензодатчики ИД-01 и задвижки с регулируемым приводом.

В процессе развития подсистемы мониторинга режимов водоснабжения Киевского района на 35 объектах было установлено 279 различных измерительных устройств и средств мониторинга. В таблице 2.3 по результатам опытно-промышленной эксплуатации системы приведены основные сравнительные характеристики, позволяющие оценить уровень технологического развития подсистемы мониторинга АСУ ТП водоснабжения, общий объем накапливаемой информации и возможности системы в области реализации функций контроля технологических параметров.

Из анализа таблицы 2.3 видно, что возможности автоматизированной системы, связанные с развитием каналов и созданием контрольных точек мониторинга, достаточно велики. При этом объемы собираемых данных также весьма значительны (около $7 \cdot 10^6$ наблюдений в год). Это позволяет применить методы поиска системных закономерностей в накопленной базе данных. Однако накопление и хранение таких объемов технологической информации невозможно без создания развитого программного обеспечения, которое обеспечивало бы поддержку работы подсистемы технологического мониторинга. Такое программное обеспечение было разработано в процессе выполнения диссертационной работы.

Создание баз данных технологической информации позволит построить информационные модели системы водоснабжения района. В этом плане построение общей модели опытно-промышленного участка системы водоподачи Киевского района города является актуальной задачей, т.к. позволит в дальнейшем разработать по имеющимся данным мониторинга адаптивные алгоритмы для оценки работы систем водоснабжения. Такие алгоритмы дадут возможность на локальном и центральном уровне системы вести непрерывную оценку эффективности водораспределения и экономичности работы насосного оборудования [83].

Таблица 2.3. – Характеристики и показатели подсистемы мониторинга опытно-промышленной АСУ ТП водоснабжения Киевского района.

№	Характеристики и показатели	Единица измерения	Базовые значения
1	2	3	4
1.	Площадь территории, где размещены объекты мониторинга и управления АСУ ТП	кв. км.	37
2.	Количество контрольных точек (объектов), в том числе: - ВУ - ПНС - других объектов (теплопункты, колодцы, оборудование и т.д.)	шт.	35
3.	Количество средств мониторинга, в том числе: - датчиков расхода - датчиков давления - датчиков электротехнических характеристик технологических устройств - других средств мониторинга и контроля	шт.	279
4.	Количество непрерывно наблюдаемых параметров	шт.	279
5.	Средняя частота измерений (по оценке интенсивности потоков данных на объектах)	изм./час	20
6.	Средняя частота передачи данных (по оценке интенсивности потоков данных на объектах)	раз/час	2
7.	Общий объем данных, накапливаемых АСУ ТП	изм./год	около $7 \cdot 10^6$

2.3 Разработка программного обеспечения системы мониторинга режимов водоснабжения объектов

Подсистема мониторинга технологическими режимами работы объектов водоснабжения представляет собой часть АСУ ТП предприятия в виде развитого аппаратно-программного комплекса [93,99,104].

Общая структура программного обеспечения системы мониторинга режимов работы водопроводных сетей и объектов водоподачи представлена на рисунке 2.4. В состав программного обеспечения входят базы данных и 17 программных модулей, обеспечивающих выполнение различных функций системы.

В системе каждая контрольная технологическая точка представляет собой производственный объект в соответствии с описанием, которое дано в разделе 2.2. В АСУ ТП контрольные объекты сведены в группы следующих типов: водопроводные узлы (ВУ), подкачивающие насосные станции (ПНС), простые контрольные точки (КТ) разных видов.

На каждом объекте работа того или иного оборудования контролируется и/или управляется промышленным компьютером архитектуры x86, работающим под управлением ОС MS-DOS.

Каждый такой компьютер оснащен радиомодемом с рацией или GSM-модемом, при помощи которых параметры работы оборудования могут передаваться в удаленную диспетчерскую, а в обратном направлении могут передаваться управляющие команды для воздействия на оборудование.

Каждая точка имеет свой уникальный номер – целое положительное число от 1 до 255 (номер 0 зарезервирован для специальной точки «центральная диспетчерская»). Этот номер выступает в качестве идентификатора и адреса точки в системе. Из других атрибутов точки можно привести ее название, принадлежность тому или иному району города, адрес (или местоположение относительно адресуемых объектов).

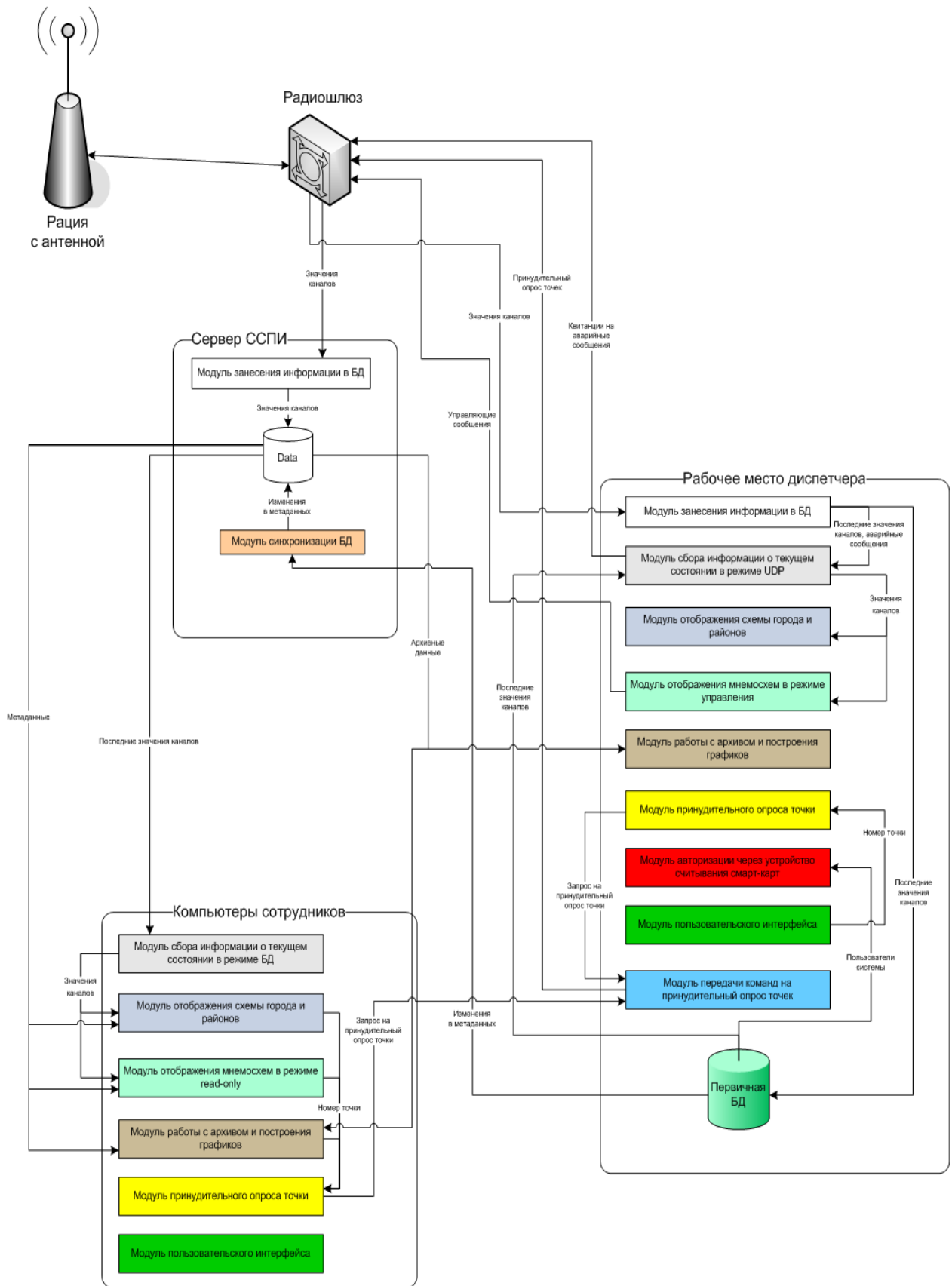


Рисунок 2.4 – Структура программного обеспечения подсистемы мониторинга режимов работы системы водоснабжения

Имеется возможность привязки к точке специальной технологической информации. Например, для каждой точки существует список установленного на ней оборудования. Оборудование бывает следующих типов: датчик, задвижка, частотный регулятор, контур управления и т.д. Каждая единица оборудования имеет номер, уникальный в рамках точки, на которой она установлена. Таким образом, комбинация номера точки и номера оборудования однозначно идентифицируют каждый отдельный элемент оборудования в рамках всей автоматизированной системы. Естественно, каждый элемент оборудования имеет название.

У конкретного элемента оборудования может быть произвольное число параметров. Каждый параметр отображает те или иные аспекты функционирования оборудования. Для простого оборудования, например, датчика давления, может быть определен всего один параметр – давление в точке установки датчика, для задвижки это уже два параметра – число оборотов, на которое задвижка открыта в данный момент, и максимальное число оборотов задвижки. У сложного оборудования, такого как частотный регулятор, может быть несколько десятков параметров, определяемых паспортом устройства. В рамках системы значения параметров передаются не в абсолютных величинах, а в относительных числовых характеристиках, соответствующих величине тока на входе АЦП, к которому подключена линия, по которой передается параметр, либо в других относительных числовых величинах, заданных производителем оборудования. Для преобразования этих относительных значений в абсолютные используются описанные ниже характеристики параметров.

Каждый параметр описывается следующими характеристиками:

- номер – уникальный идентификатор параметра в пределах данной единицы оборудования;
- наименование параметра;
- единицы измерения;
- коэффициент и сдвиг – величины, необходимые для получения абсолютных значений параметра из относительных значений величины

(абсолютное значение = относительное значение/коэффициент+сдвиг);

- позиция параметра в общем пакете информации о значениях параметров, который передается с контрольной точки в центральную диспетчерскую;

- точность – значимое количество цифр дробной части значения параметра;

Таким образом, по каждому удаленному технологическому объекту можно уникально идентифицировать параметр в рамках всей системы следующей комбинацией цифр: номер точки, номер оборудования и номер параметра.

Характеристика технического обеспечения нижнего уровня системы на технологических объектах была дана в разделе 2.2.

Основными элементами аппаратного обеспечения верхнего уровня системы является радиошлюз, сервер системы связи и передачи информации (ССПИ), также компьютеры пользователей системы.

Радиошлюз предназначен для обеспечения обмена данными с удаленными технологическими объектами, представленными в виде контрольных точек или объектов управления.

Сервер ССПИ является хранилищем информации, поступающей из ССПИ. Все технологические параметры, поступающие от объектов автоматизации на радиошлюз, передаются на сервер ССПИ, который заносит их в базу данных (БД) для последующего хранения. Кроме того, сервер является хранилищем метаданных, описывающих структуру автоматизированной системы мониторинга и управления водоснабжением. Данные о структуре системы, соответствии названий и номеров объектов системы хранятся в этой БД. При необходимости данный сервер позволяет пользователям системы производить принудительный опрос объектов автоматизации для получения достоверных оперативных данных о состоянии технологических параметров.

На уровне аппаратного обеспечения сервер представляет собой компьютер архитектуры x86. Аппаратные требования к серверу ССПИ:

- один центральный процессор классом не ниже Intel Celeron 1.7Ghz или AMD Sempron 2000+;

- ОЗУ объемом 256Mb и более;

- ПЗУ объемом 4Гб и более (установлены два ПЗУ для хранения рабочей версии БД и ее архивных копий на отдельных ПЗУ);
- сетевой интерфейс с возможностью работы с протоколом MS TCP/IP.

Программные требования к серверу ССПИ заключаются в работе сервера под управлением операционной системы MS Windows 2000/XP/2003 любой версии.

Программное обеспечение системы состоит из ПО верхнего и нижнего уровней. Программное обеспечение верхнего уровня включает 17 программных модулей. Краткое описание наиболее важных модулей системы приведено ниже.

Модуль занесения информации в БД предназначен для получения информации от удаленных объектов через радиоплюз и занесения полученной информации в базу данных. Функционально модуль оформлен в виде системного сервиса операционной системы. Модуль представляет собой приложение для среды выполнения Microsoft .NET Framework 2.0.

Модуль состоит из 3-х файлов:

- *SspiListener.exe* – главная программа;
- *Unsafe.dll* – сборка, содержащая функции, использующие неуправляемый код для побайтового извлечения содержимого пакета;
- *ListenerSettings.xml* – конфигурационный файл.

При запуске модуль открывает UDP-порт по адресу 127.0.0.1:5001, который в последствии используется для передачи сообщений о необходимости завершения работы рабочим потокам сервиса. Кроме того, при запуске создаются объект-логгер, ведущий протоколирование работы, очередь полученных пакетов и *mutex* для синхронизации доступа к ней.

После запуска модуль создает два потока. Первый поток открывает UDP порт и начинает сбор входящих пакетов данных. Входящие пакеты проходят проверку и организовываются в очередь – структуру данных в ОЗУ, основанную на принципе FIFO.

При старте второго потока создается соединение с СУБД, управляющей базой данных. Соединение создается с использованием строки соединения, хранящейся в параметре *MyDBCConnectionString* конфигурационного файла. При

разрыве этого соединения или невозможности его установки поток предпринимает периодические попытки восстановить связь. При ошибке работы с БД поток разрывает это соединение и создает его заново. Через определенные промежутки времени (от 1 до 5 секунд) этот поток проверяет вышеописанную очередь на наличие в ней пакетов. В случае наличия таковых поток производит запись информации из пакетов в БД и удаляет блоки из очереди. Перед записью информации производится ее проверка на соответствие структуры данных в пакете структуре информации о конкретной точке в БД. После этого информация о значениях параметров записывается в таблицы с архивами показаний каждой конкретной точки и в таблицу текущих значений параметров.

Модуль обеспечивает обязательный аудит происходящих в течение работы событий с настраиваемым уровнем детализации. За уровень детализации лога отвечает параметр *LogLevel* конфигурационного файла. Возможные значения – *Normal*, *Extended*, *Full*. Запись событий производится в журнал «*SSPI Listener Service*», доступный через оснастки *тмс* «*Просмотр событий*» и «*Управление компьютером*». Журнал автоматически создается при инсталляции сервиса.

База данных является центральным хранилищем информации системы. В базе данных хранятся следующие категории данных:

- технологические параметры водопроводных сетей;
- метаданные, описывающие структуру автоматизированной системы.

База данных состоит из следующих таблиц:

- таблица точек;
- таблица оборудования;
- таблица параметров оборудования;
- вспомогательные справочники с названиями районов, типами точек, единицами измерения и т.п.;
- таблицы конфигурационных параметров для модулей системы;
- архив значений параметров, поступающих от радиошлюза.

Кроме выполнения функций по хранению данных, БД несет и определенную программную логику. Так, например, при занесении показаний датчиков в базу

данных встроенные процедуры производят пересчет относительных показаний в абсолютные значения физических величин с учетом специфики каждого конкретного датчика.

Модуль передачи команд на опрос точек предназначен для принудительного опроса точек о состоянии технологических параметров. В случае, если технологические параметры на точке не меняются с течением времени, точка передает их значения в центральный диспетчерский пункт достаточно редко (по умолчанию 1 раз в час). В связи с этим возникает ситуация, в которой необходимо определить, почему точка не выходит на связь в течение длительного времени. Подобная ситуация может быть в следующих случаях: технологические параметры объекта мониторинга не изменяются; произошла поломка передающего оборудования; отсутствует электропитание и т.д. Для реализации необходимой контрольной функции в клиентском ПО предусматривается возможность отправить запрос на внеочередную передачу параметров конкретной точкой системы. При этом предусмотрена двухуровневая реализация отправки запроса. Клиентская программа посылает запрос на передачу параметров модулю передачи команд, который выстраивает запросы пользователей в очередь и отправляет их на радиошлюз, соблюдая нижеописанные правила корректности опроса.

Функционально модуль оформлен в виде системного сервиса операционной системы. При запуске операционной системы модуль запускается автоматически и начинает работу. При аварийном завершении работы модуля операционная система производит его перезапуск.

После успешного запуска модуль создает два потока. Первый поток открывает UDP-порт и начинает сбор пакетов, приходящих от клиентов. Приходящие пакеты проходят первичную обработку по выделению из них полезной информации. Модуль ведет учет информации о том, когда на каждую из точек системы в последний раз отсылался запрос о принудительном сборе параметров и допускает отсылку повторного запроса на один и тот же узел только по истечении определенного интервала времени. Если получен запрос на опрос

точки, которая уже принудительно опрашивалась ранее, программа вычисляет интервал времени, прошедший с момента предыдущего опроса. Если этот интервал меньше чем заранее заданный минимальный временной интервал между принудительными опросами, то программа отбрасывает данный запрос. Кроме того, программа проверяет в базе данных время прихода последней посылки от этой точки и отбрасывает пакет, если с этого момента прошел интервал времени, меньший заданного. В остальных случаях модуль переходит к формированию блока информации для посылки на радиошлюз. Полученные блоки организовываются в очередь – структуру данных в ОЗУ, основанную на принципе FIFO. В случае достижения очередью заранее заданного максимального размера программа отбрасывает любые запросы на принудительный опрос.

Второй поток через определенные промежутки времени (период конфигурируется) проверяет очередь на наличие в ней информационных блоков. В случае наличия таковых поток производит формирование из первого в очереди блока UDP-пакета и передачу его на радиошлюз. В случае успешной передачи UDP-пакета поток удаляет соответствующий блок из очереди. Выборка пакетов из очереди осуществляется по одному пакету через заданный временной интервал во избежание переполнения среды передачи пакетами принудительного опроса параметров.

Модуль отображения карты города предназначен для визуализации схемы города, разбитой на районы, и отображения на схеме выбранной пользователем территории. При этом на схеме представляются контрольные точки, расположенные в данном районе, и отображается их текущее состояние и технологические параметры.

Данный модуль создан на основе использования геоинформационной системы. Первый этап создания ГИС был связан с проведением паспортизации инженерных коммуникаций водоснабжения. Основой электронной карты послужили материалы аэрофотосъемки, планшеты на жесткой основе масштаба 1:2000, а также планшеты масштаба 1:500. Планшеты сканировались для получения растрового изображения, которое в дальнейшем переводилось в

векторный вид. На основе геоинформационной системы был создан программный комплекс инвентаризации сетей и расчета гидравлических режимов (Рисунок 2.5).

ГИС предприятия позволяет: иметь графическое представление сетей водоснабжения с полным описанием топологии; вести паспорта сетей; визуализировать детализированные схемы узлов/участков; выполнять пространственные запросы, готовить справки и отчеты; проводить автодокументирование и т.д. Система позволяет также выполнять расширенную паспортизацию оборудования водопроводных узлов (внутреннее оборудование колодцев и камер, водоводов, источников, насосных станций, регулирующих узлов) с применением справочников и классификаторов, проводить гидравлические расчеты и моделирование водопроводных сетей произвольной размерности.

При запуске клиентского приложения на экране пользователя отображается карта города – схематическое отображение границ города с нанесенными границами районов. На схеме присутствуют названия каждого из районов, являющиеся по сути гиперссылками, при переходе по которым открывается схема выбранного района.

Схема района представляет собой схематическое изображение границ заданного района с нанесенными графическими объектами, представляющими точки системы. Изображения точек наносятся в соответствии с их географическим расположением и отображают текущее состояние объекта мониторинга и управления. На каждом изображении объекта присутствуют числовые характеристики – значения технологических параметров точки. У пользователя имеется возможность выбрать тип мнемосхемы района: «давления», «расходы», «электрическая энергия» и т.п. При помощи цветовой индикации (цвет рамки, мигание рамки, цвет заливки и т.п.) изображение объекта информирует пользователя о времени, когда точка последний раз выходила на связь, об аварийном состоянии на точке, о выходе одного/нескольких технологических параметров за пределы допустимых значений. У пользователя есть возможность выбрать какую-либо точку и произвести для нее

принудительный опрос параметров или открыть мнемосхему точки.

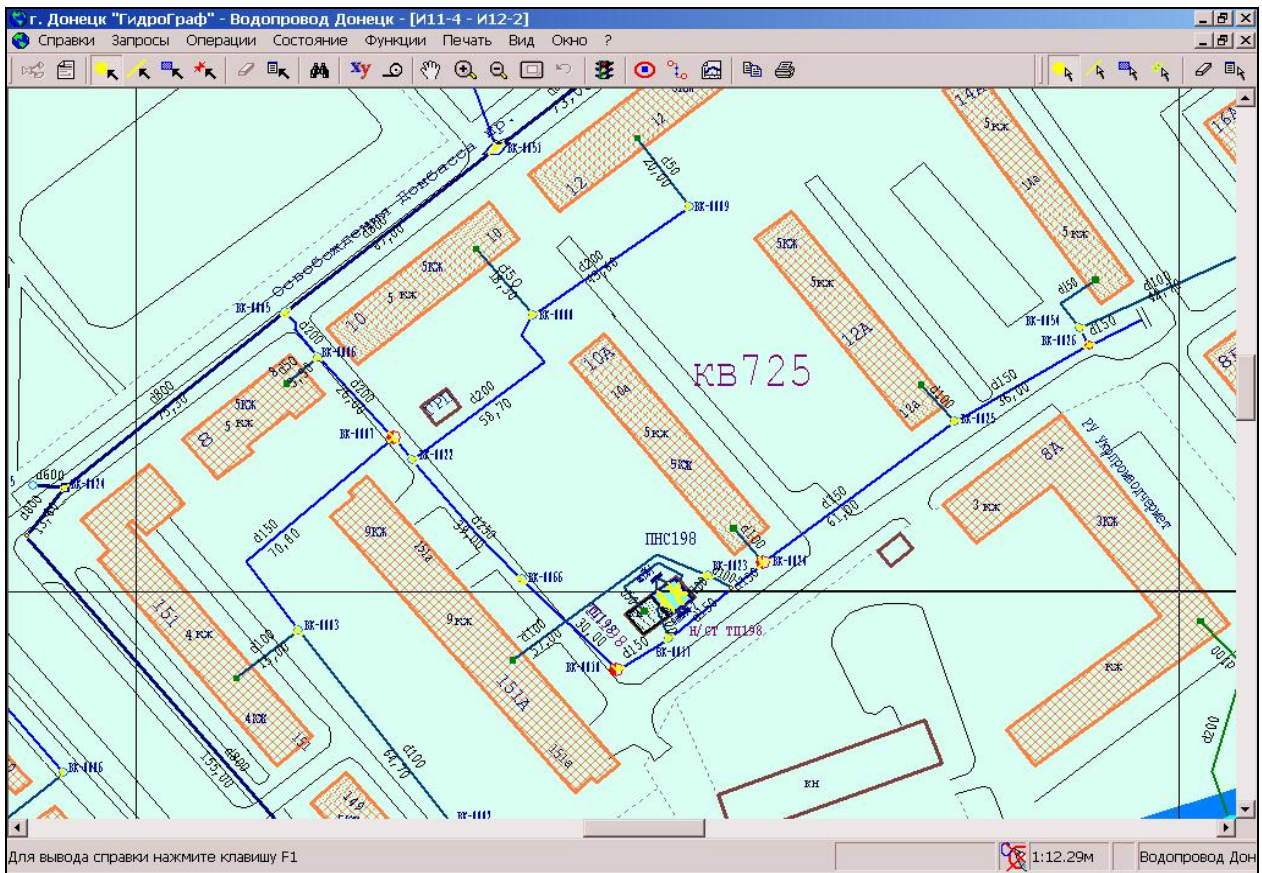


Рисунок 2.5 – Представление объектов водоснабжения в геоинформационной системе водопроводных сетей КП «Донецгорводоканал»

При просмотре схемы района пользователь может в любой момент вернуться к схеме города, чтобы перейти к просмотру другого района. Возможен также переход к отображению схемы какого-либо района прямо из схемы другого района путем использования «горячих клавиш» от «1» до «9».

Модуль анализа данных предназначен для просмотра информации о показаниях датчиков за предыдущие периоды времени и построения графиков их изменения.

При обращении пользователя к функции отображения архива открывается главное окно модуля. Здесь пользователю предоставляется возможность выбрать период времени, за который необходимо отобразить информацию, выбрать точку, оборудование и параметры, которые необходимо отобразить. По умолчанию в

качестве временного интервала устанавливаются прошедшие 24 часа с текущего момента времени. После того, как пользователь введет вышеуказанные параметры, модуль отображает в табличном виде показания выбранных датчиков. Также в интерфейсе пользователя присутствует возможность построения графика, отображающего динамику изменения выбранных параметров на протяжении выбранного временного интервала.

Остальные модули системы, приведенные на рисунке 2.4, обеспечивают реализацию различных дополнительных функций системы, позволяющих расширить функциональные возможности АСУ ТП предприятия.

Протоколы связи. Связь удаленных технологических объектов с центральной диспетчерской осуществляется посредством радиоканала на частоте 37,425 кГц на скорости 2400 бод. Протокол связи позволяет передавать показания датчиков, при этом обеспечивается опрос текущего состояния, а также настройка аппаратной части и управление оборудованием на объекте контроля. Надежность радиоканала повышена подтверждением принятого пакета квитанцией и включением в формат пакета поля контрольной суммы.

Данные в стандартном режиме работы передаются по инициативе клиентской части комплекса (ВУ, ПНС, контрольной точки). Пакет данных передается периодически с заранее установленным временным интервалом. Также данные могут быть переданы в ответ на принудительный запрос от серверной части либо в случае, если произошло резкое изменение параметра (значение параметра превысило установленный диапазон по сравнению с ранее переданным значением). Пределы изменения значения параметра можно устанавливать от 1 до 100% с шагом 1%. Для контроля работоспособности принудительный опрос удаленных клиентов сервером производится через час после принятия последнего пакета. Каждый принятый от клиента пакет данных сервер подтверждает пакетом квитанции. Клиент, не получивший квитанцию на отправленный пакет повторяет передачу посылки до получения квитанции не более заданного количества попыток. Если сервер не отвечает клиенту, клиент переходит в режим ожидания запроса данных. В этом режиме клиент не передает данные по собственной

инициативе. После получения запроса данных от серверной части и ответа на него, возобновляется стандартный режим работы с передачей по инициативе клиента.

Разработанное программное обеспечение для опытно-промышленной эксплуатации было установлено в диспетчерском пункте мониторинга и управления режимами работы системы водоснабжения Киевского района города Донецка с целью отработки технических и программных решений для основных элементов АСУ ТП предприятия «Донецкгорводоканал». ПО эксплуатировалось в течение нескольких лет. За это время был накоплен положительный опыт эксплуатации системы и созданы базы данных ретроспективной и текущей информации о работе оборудования и формировании технологических режимов водоснабжения района.

Опыт эксплуатации АСУ ТП системы водоснабжения Киевского района города Донецка позволил выйти на масштабные работы по внедрению средств мониторинга и технологического управления на предприятиях водоснабжения.

2.4 Закономерности и статистические модели формирования режимов работы городских систем водоснабжения

Формирование баз данных мониторинга режимов работы городских систем водоснабжения дает возможность применить методы интеллектуального анализа данных. Пока такие методы используются в АСУ ТП на предприятиях водоснабжения недостаточно. Однако наличие крупных баз данных, содержащих технологическую информацию, закономерно ставит вопрос о выборе методов Data mining для изучения постоянно растущих объемов информации.

Известно, что интеллектуальный анализ данных – позволяет выявить скрытые закономерности в больших объемах информации. Буквально несколько месяцев опытной эксплуатации АСУ ТП водоснабжения Киевского района г. Донецка позволили накопить объем информации достаточный для использования методов Data mining. Данные методы дают возможность получать

закономерности, определяющие формирование технологических режимов городских систем водоснабжения.

Преимуществом таких подходов является отказ от использования методов гидравлических и энергетических расчетов, которые требуют большого количества исходных данных, имеющих достаточно высокую погрешность и низкую достоверность. При этом на смену традиционным методам приходят адаптивные методы, когда простые зависимости с небольшим количеством входных и выходных переменных получают путем обработки информации взятой из технологических баз данных.

Основной целью разработки моделей функционирования системы водоснабжения Киевского района г. Донецка является существенное снижение количества исходных данных, которые обладают значительной неопределенностью. Традиционные расчетные методики требуют задания многих параметров: диаметров трубопроводов, коэффициентов гидравлических сопротивлений участков, данных о перепадах высот и скоростных характеристиках сетей, данных о местных сопротивлениях и т.д. Вся эта информация применительно к длительно эксплуатирующимся системам водоснабжения обладает невысокой достоверностью и значительной неопределенностью.

Снижение количества исходных данных возможно путем удаления из расчетов наиболее неопределенных участков сетей и представления их моделями, описывающими напорные и расходные характеристики. Это позволяет с высокой достоверностью построить модель центральной части системы водоснабжения, которая охватывает сеть, где размещены основные насосные системы водораспределительных узлов и подкачивающих насосных станций, потребляющих основное количество энергии.

Однако, построение напорных характеристик объектов водоснабжения или участков водораспределительных сетей с элементами регулирования требует предварительного изучения имеющейся технологической информации. Не всегда аналитические модели, полученные для стационарных или квазистационарных

гидравлических режимов, могут быть распространены на динамические режимы, которые наблюдаются в условиях автоматического регулирования работы систем.

Анализ водораспределительной сети опытного участка позволяет сделать вывод о необходимости построения различных моделей объектов, на основе которых в дальнейшем может быть осуществлен синтез моделей, охватывающих крупные участки водопроводной сети. Среди таких моделей следует выделить:

- модели подкачивающих насосных станций;
- модели простых участков водопроводной сети между двумя ближайшими контрольными точками;
- модели сложных участков сети, содержащих несколько контрольных точек и представляющих собой целые ветви сети.

Анализ информации, накопленной в технологической базе данных водоснабжения Киевского района позволил сделать вывод, что расчетные модели объектов водоснабжения и водораспределения, определяющие напорные характеристики, могут быть заменены простыми стохастическими моделями временных рядов. Наиболее распространенными методами прогнозирования временных рядов являются [67,68,69,70]:

- метод авторегрессии и проинтегрированного скользящего среднего (метод АРПСС) – построение параметрических моделей временных рядов;
- метод распределенных лагов – построение регрессии одного ряда на другой;
- методы сезонной (циклической) декомпозиции – построение аддитивной или мультипликативной модели ряда относительно тренда, циклической составляющей и нерегулярной случайной компоненты;
- экспоненциальное сглаживание – прогнозирование временных рядов, сглаженных с экспоненциальными весами.

Будем использовать данные методы при поиске закономерностей в базах данных технологической информации предприятий водоснабжения.

2.4.1 Модели распределенных лагов подкачивающих насосных станций

Для построения моделей режимов работы ПНС из базы данных технологической информации формировались выборки данных по каждой ПНС, при этом проводилось одновременное снятие сигналов на линиях входа и подачи воды с различными интервалами во времени. Выборки данных охватывали периоды времени не менее одного месяца, временные интервалы снятия данных выбирались равными 10, 15, 30 и 60 минут.

Для работы с информацией был разработан модуль сортировки и обработки данных, входящий в состав программного обеспечения системы мониторинга. Все имеющиеся данные для исследовательских задач представлялись в виде файлов временных рядов с лагом 10 и 30 минут формата Excel. Учитывая большой объем собранных данных (около 100 тыс. измерений), поиск системных закономерностей формирования технологических режимов осуществлялся в программном продукте Statistica.

В результате исследований было установлено, что расчетные модели объектов системы водоснабжения, определяющие напорные характеристики, могут быть заменены простыми регрессионными моделями одного временного ряда относительно другого. Из всех четырех методов прогнозирования временных рядов наилучший результат достигнут при применении метода распределенных лагов. Это наиболее распространенный метод построения регрессии одного ряда на другой [67, 68].

Анализ распределенных лагов – это специальный метод оценки запаздывающей зависимости между временными рядами. Общая модель распределенных лагов имеет вид:

$$P_2(t) = a_0 \cdot P_1(t) + a_1 \cdot P_1(t-1) + \dots + a_n \cdot P_1(t-n), \quad t = 1, 2, \dots, n \quad (2.1)$$

где $P_2(t)$ – зависимый ряд наблюдений, $P_1(t)$ – независимый ряд наблюдений, t – время, n – лаг запаздывания.

Данный метод – это один из распространенных методов системного анализа,

имеющий перспективы при установлении закономерностей в базах данных, которые отличаются пространственно-временным распределением [86].

На рисунках 2.6 и 2.7 приведены характерные распределения временных рядов давления воды на входе и выходе ПНС для различных периодов снятия информации [88]. Экспериментальные исследования в разные периоды времени показали, что переходные процессы на ПНС при изменении режимов работы системы происходят достаточно быстро. Установлено, что давление на выходе ПНС при изменении давления на входе или режима работы насоса стабилизируется за 5 – 10 минут. Поэтому для уменьшения объема хранимой в базе данных информации использовались два алгоритма считывания данных. В процессе проведения экспериментальных исследований снятие данных по всем контрольным точкам проводилось с периодом 30 минут. В свою очередь, в процессе эксплуатации системы снятие данных по контрольным точкам ведется только при изменении режима работы управляемого объекта.

Выполненный анализ данных показывает, что между линиями входа и выхода ПНС не всегда существует явно выраженная зависимость, которая может быть установлена обычным регрессионным анализом без привлечения методов прогнозирования временных рядов.

Например, если для ПНС Артема 102б существует закономерная связь по давлению между линиями входа и выхода (Рисунок 2.8), то для ПНС квартал 238, квартал Киевский 2 и др., такой явной корреляционной связи нет (Рисунок. 2.9). Кроме того, система управления работой ПНС может реализовывать в течении суток несколько режимов, например, как это показано на рисунке 2.10, или формировать целый спектр режимов работы ПНС (Рисунки 2.11, 2.12).

В связи с этим необходим поиск временных закономерностей в базе данных, характеризующей режимы работы ПНС. Выполненный анализ показал, что метод распределенных лагов позволяет выявить эти закономерности и получить простые модели для прогнозирования режимов работы ПНС. В таблице 2.4 приведены модели распределительных лагов для ряда ПНС, показанных на рисунке 2.3 [88]. Модели являются практически функциональными зависимостями, т.к.

коэффициенты корреляции достаточно высоки.

Анализ уравнений, приведенных в таблице 2.4, указывает на наличие общих системных закономерностей формирования режимов работы ПНС. Данные зависимости могут быть использованы при разработке алгоритмов, которые в реальном времени по данным мониторинга позволяют оптимизировать напорные характеристики ПНС.

Таблица 2.4. – Параметры модели распределенных лагов для ПНС Киевского района г.Донецка.

№	Наименование объекта	Вид модели	Коэффициент корреляции
1	ПНС Домостроитель	$P_2(t) = 1,441 \cdot P_1(t)$	0,983
2	ПНС Квартал 234	$P_2(t) = 1,826 \cdot P_1(t) + 1,938 \cdot P_1(t-1)$	0,930
3	ПНС Квартал 735	$P_2(t) = 0,637 \cdot P_1(t) + 0,888 \cdot P_1(t-1)$	0,983
4	ПНС ул. Стратонавтов	$P_2(t) = 1,010 \cdot P_1(t) + 0,601 \cdot P_1(t-1)$	0,804
5	ПНС кв. «Синтетика»	$P_2(t) = 1,056 \cdot P_1(t) + 0,924 \cdot P_1(t-1)$	0,995
6	ПНС Квартал 268	$P_2(t) = 0,899 \cdot P_1(t) + 1,022 \cdot P_1(t-1)$	0,970
7	ПНС Квартал 238	$P_2(t) = 2,771 \cdot P_1(t-1)$	0,968
8	ПНС Киевский-4	$P_2(t) = 1,571 \cdot P_1(t) + 0,851 \cdot P_1(t-1)$	0,990
9	ПНС Киевский-2, КТ-1	$P_2(t) = 1,175 \cdot P_1(t) + 1,390 \cdot P_1(t-1)$	0,983
10	ПНС Киевский-2, КТ-2	$P_2(t) = 0,375 \cdot P_1(t) + 0,368 \cdot P_1(t-1)$	0,989
11	ПНС пос. Взлетный	$P_2(t) = 2,437 \cdot P_1(t) + 1,133 \cdot P_1(t-1)$	0,927
12	ПНС Шахтерский-1	$P_2(t) = 1,147 \cdot P_1(t) + 1,489 \cdot P_1(t-1)$	0,985
13	ПНС м-р Артема 1026	$P_2(t) = 2,798 \cdot P_1(t-1)$	0,995

Продолжение таблицы 2.4

14	ПНС Привокзальный-2	$P_2(t) = 1,438 \cdot P_1(t) + 1,389 \cdot P_1(t-1)$	0,960
15	ПНС Квартал 196	$P_2(t) = 0,786 \cdot P_1(t) + 0,952 \cdot P_1(t-1)$	0,985
16	ПНС м-р Ветковский	$P_2(t) = 3,015 \cdot P_1(t) + 2,254 \cdot P_1(t-1)$	0,961
17	ПНС Квартал 628	$P_2(t) = 0,919 \cdot P_1(t)$	0,998

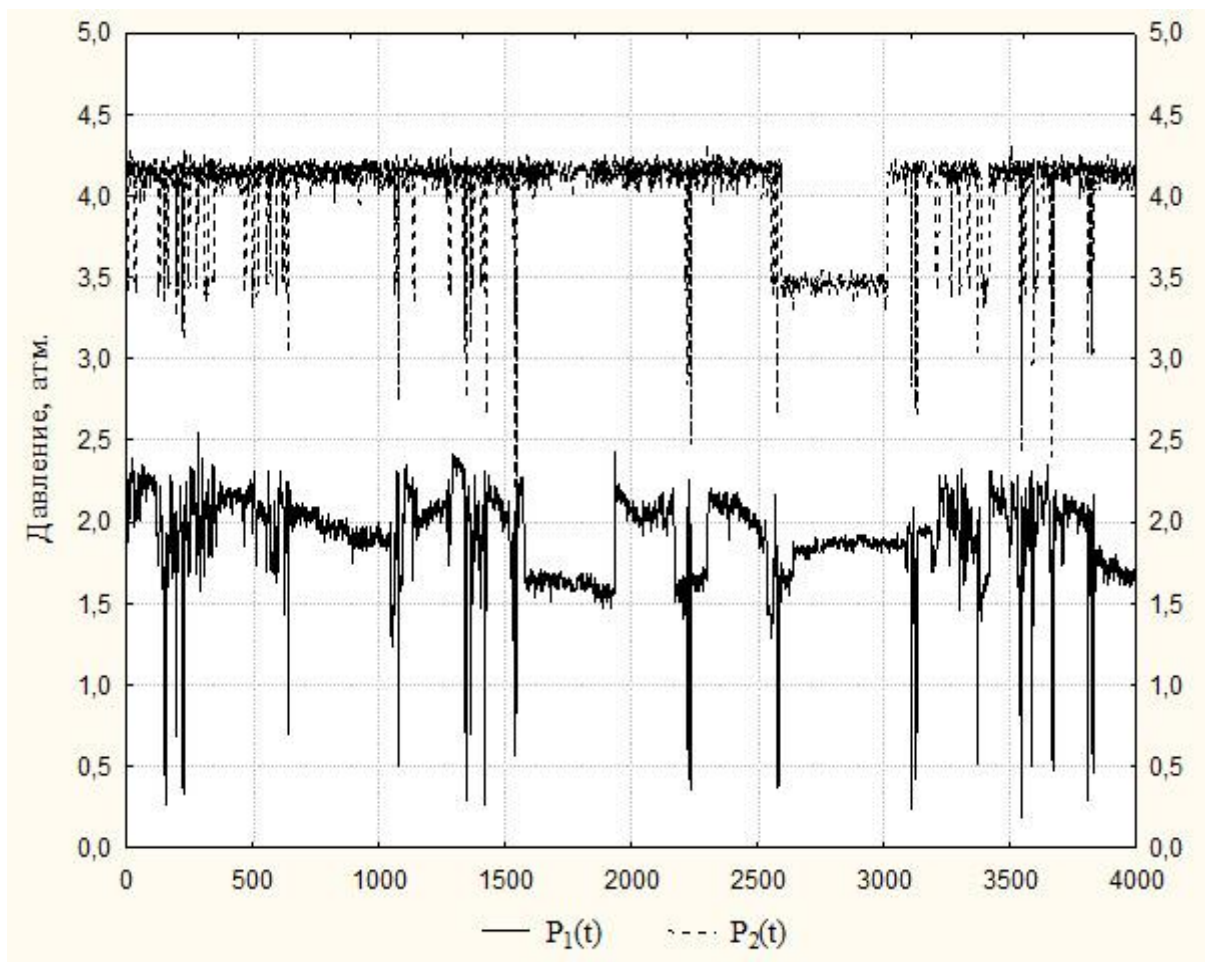


Рисунок 2.6 – Временные ряды входного ($P_1(t)$) и выходного ($P_2(t)$) давления для ПНС квартал 196. Один лаг временного ряда – 10 минут

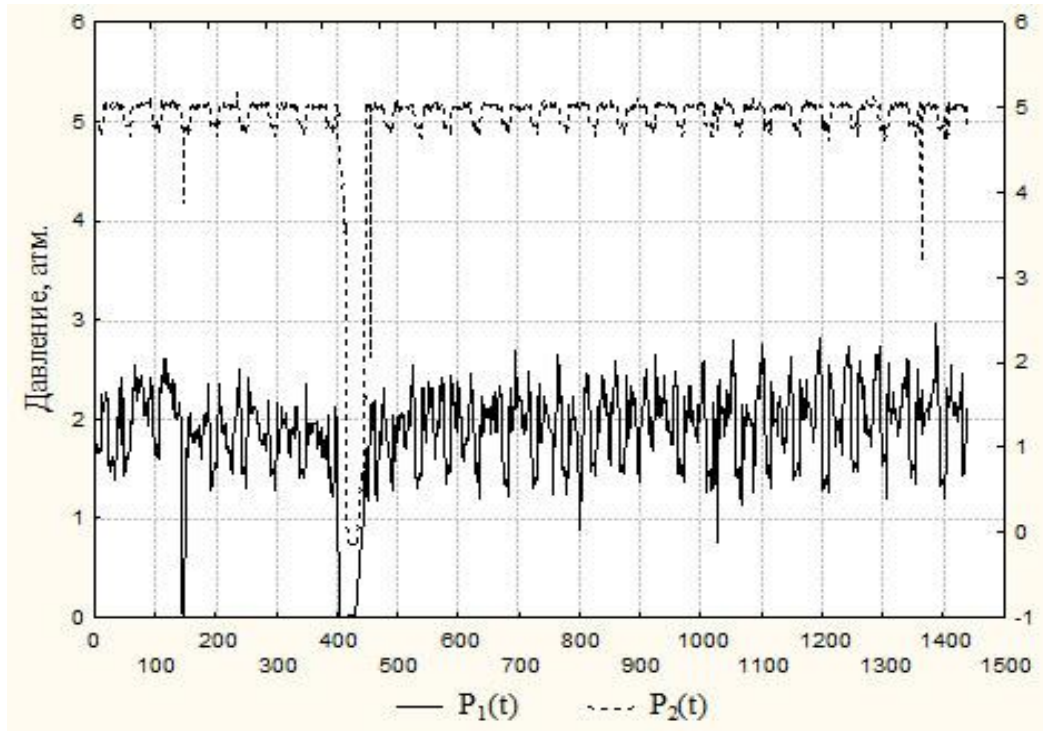


Рисунок 2.7 – Временные ряды входного и выходного давления для ПНС квартал 196. Один лаг временного ряда – 30 минут

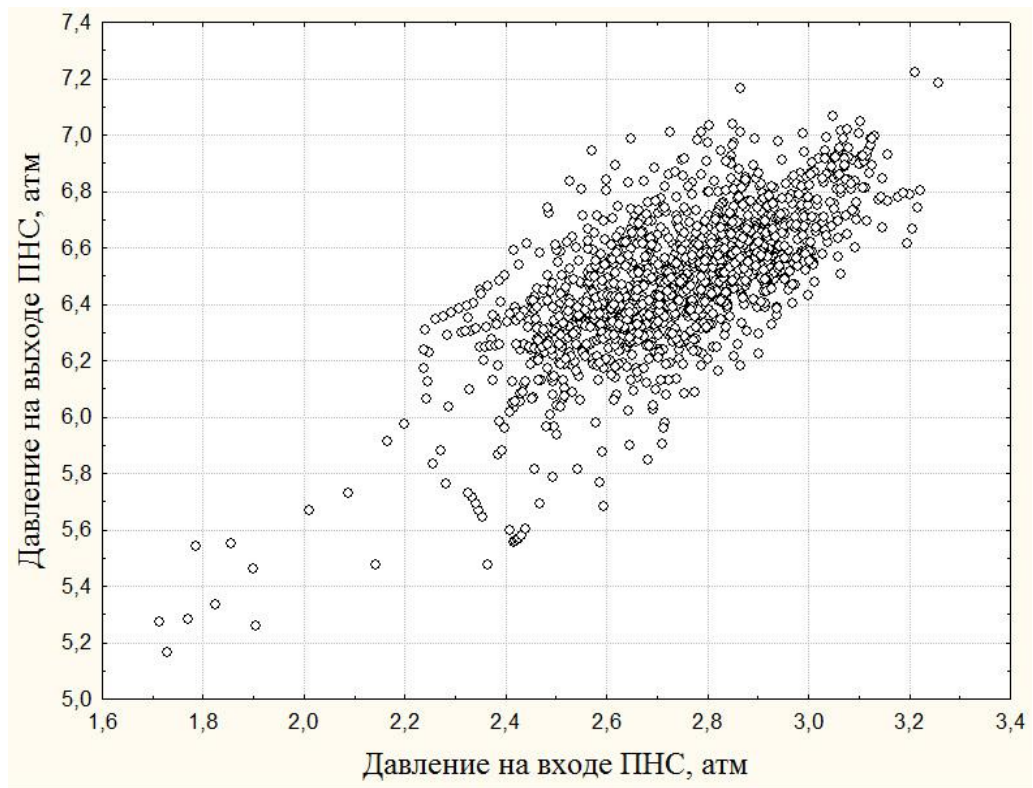


Рисунок 2.8 – Зависимость давления на линиях входа и выхода ПНС Артема
1026

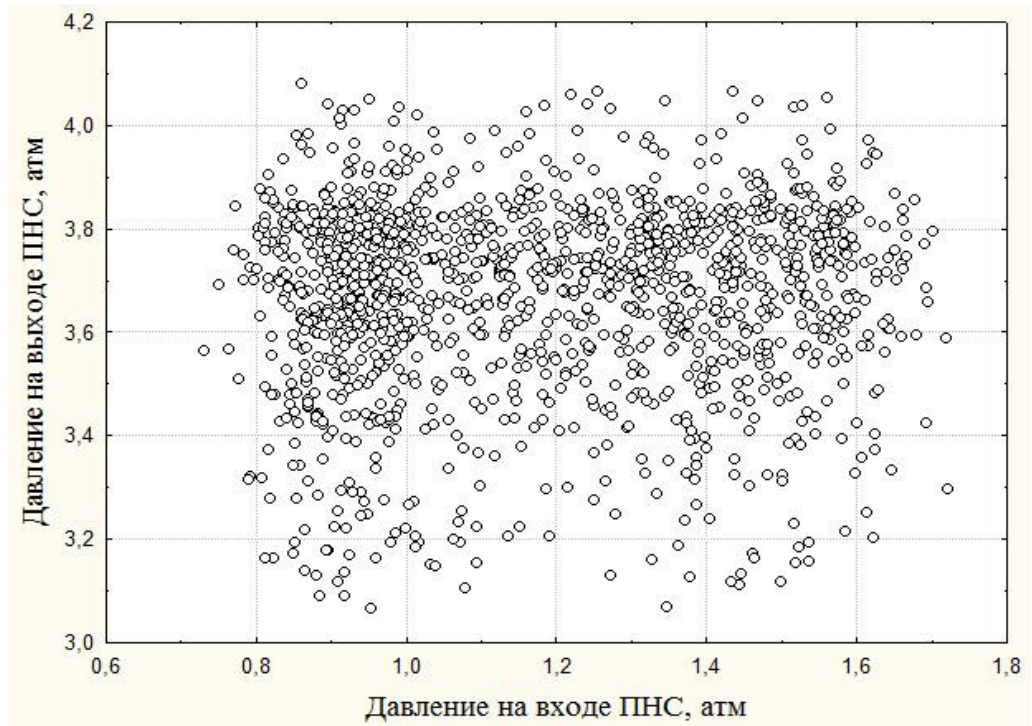


Рисунок 2.9 – Зависимость давления на линиях входа и выхода ПНС квартал 238

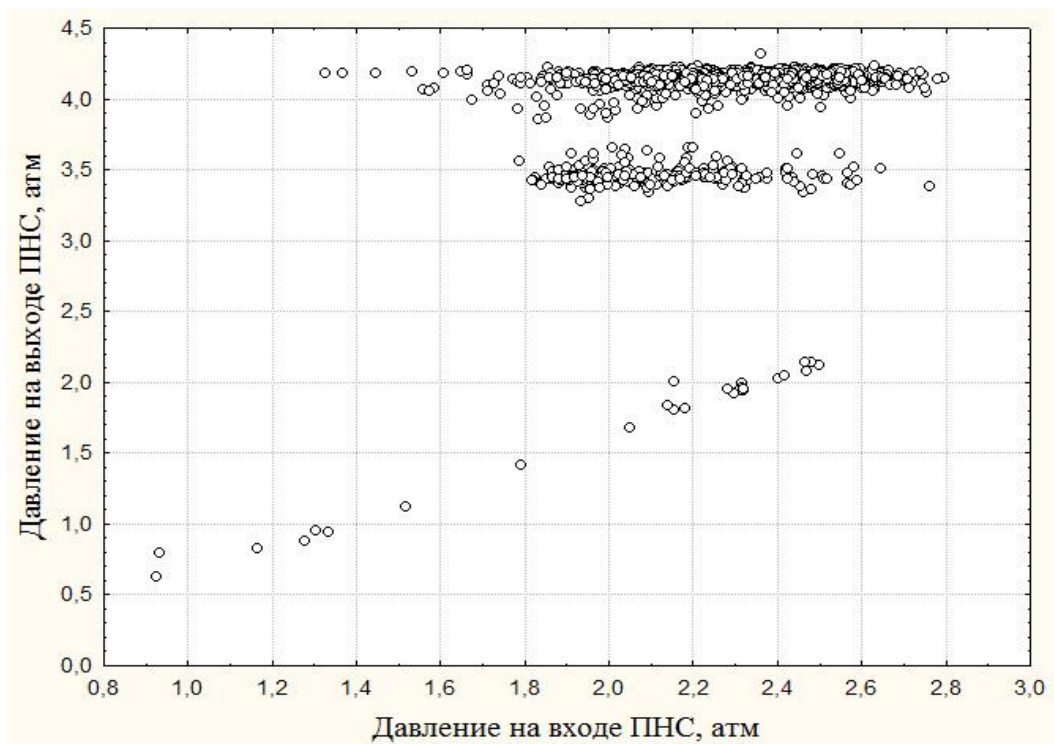


Рисунок 2.10 – Зависимость давления на линиях входа и выхода ПНС квартал 196

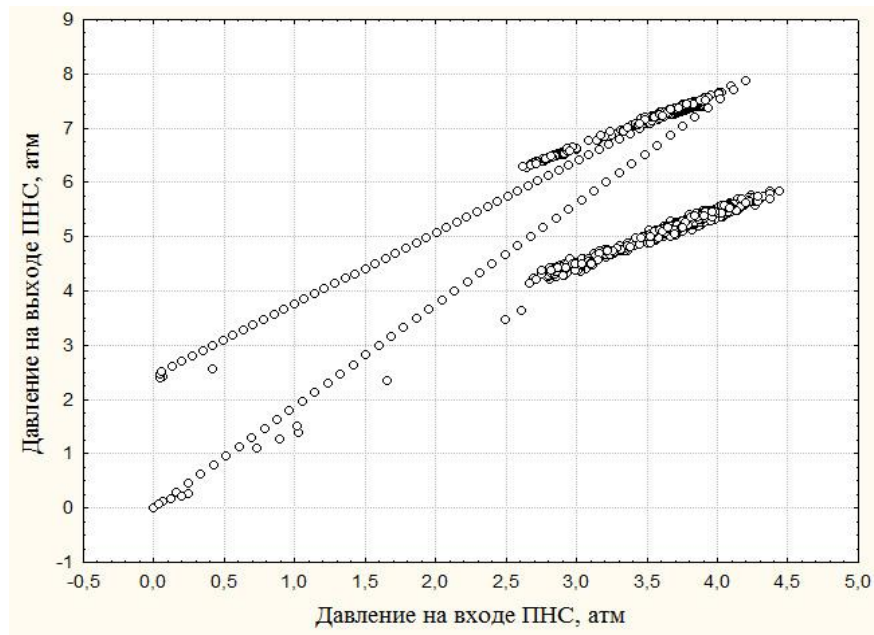


Рисунок 2.11 – Зависимость давления на линиях входа и выхода ПНС кв. Домостроитель

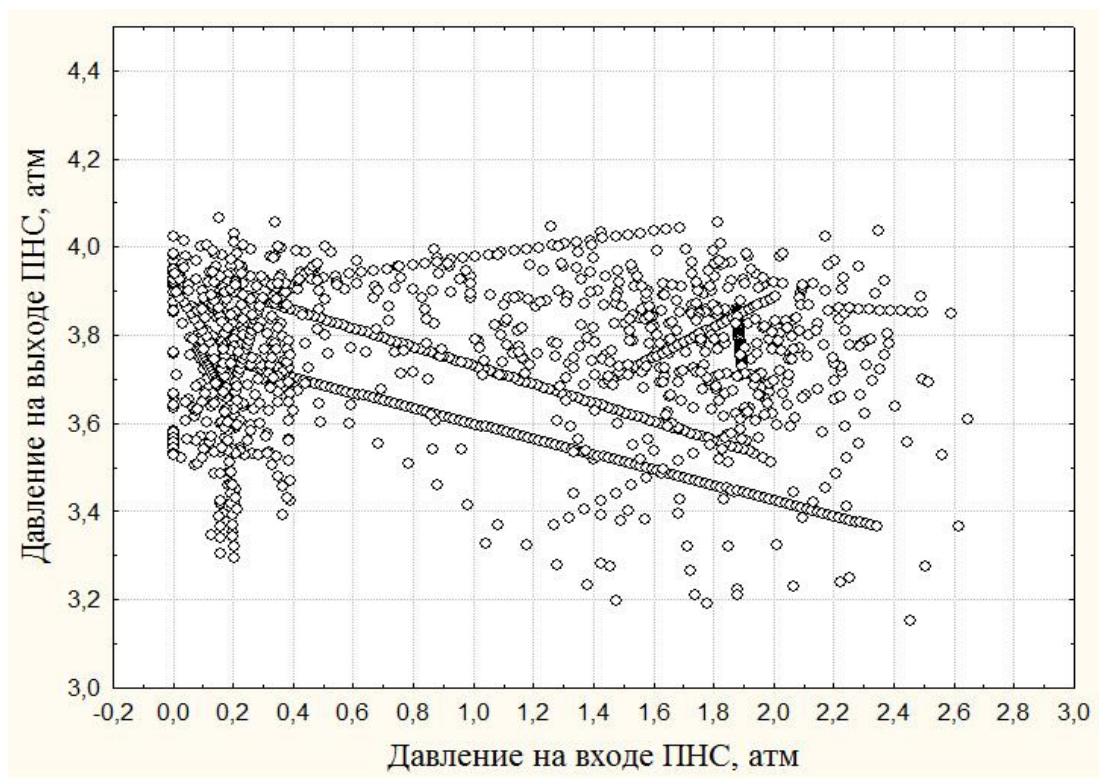


Рисунок 2.12 – Зависимость давления на линиях входа и выхода ПНС кв. Стратонавтов

2.4.2 Модели участков водораспределительных сетей

Для построения моделей режимов работы водораспределительных сетей из базы данных технологической информации формировались выборки данных по различным участкам, включающим линии подачи воды различной протяженности. В процессе накопления массивов данных проводилось одновременное снятие значений давления воды в контрольных точках – на входе и выходе исследуемого участка. Выборки данных охватывали периоды времени не менее одного месяца, временные интервалы снятия данных выбирались равными 30 минут. Всего для исследования было выбрано около 40 участков водораспределительных сетей Киевского района города Донецка между различными ПНС. Участки выбирались таким образом, чтобы между контрольными точками не было ПНС, насосы которых скачкообразно изменяют давление воды при подаче потребителям.

Построение моделей водоснабжения участков водораспределительных сетей будем основывать на применении гидравлических моделей с сосредоточенными параметрами и статистических закономерностей. Определение напорных характеристик участков водораспределительных сетей при регулировании технологических режимов можно основывать на гидравлических моделях распределительных трубопроводов [93,94,95]. Известно, что зависимость напора от изменения расхода по длине распределительного трубопровода имеет вид [62]:

$$\Delta h = \lambda \cdot \frac{l}{2 \cdot D \cdot g \cdot \omega^2} \left(Q_0^2 - Q_0 Q_p + \frac{Q_p^2}{3} \right) - \frac{a_*}{g \cdot \omega^2} \left(Q_0 Q_p - \frac{Q_p^2}{2} \right), \quad (2.2)$$

где Q_0, Q_p – расход в начале участка и путевой (раздаваемый потребителям на участке) расход; λ – коэффициент гидравлического сопротивления участка; D, ω – диаметр и сечение трубопроводов; g – ускорение свободного падения; a_* – некоторая константа, характерная для изучаемого участка.

Учитывая баланс расходов $Q_0 = Q_k + Q_p$, где Q_k – расход в конце участка (транзитный расход) получим уравнение (2.2) в виде:

$$\Delta h = \lambda \cdot \frac{l}{6 \cdot D \cdot g \cdot \omega^2} (Q_0^2 + Q_0 Q_k + Q_k^2) - \frac{a_*}{2 \cdot g \cdot \omega^2} (Q_0^2 - Q_k^2), \quad (2.3)$$

Для протяженных участков распределительных трубопроводов вторым слагаемым в уравнении (2.2) пренебрегают. Учитывая также, что $\omega = \pi \cdot D^2/4$, получим зависимость для потери напора:

$$\Delta h = \frac{8 \cdot \lambda \cdot l}{3 \cdot g \cdot \pi^2 \cdot D^5} (Q_0^2 + Q_0 Q_k + Q_k^2) = \frac{1}{3} S_0 \cdot l \cdot (Q_0^2 + Q_0 Q_k + Q_k^2), \quad (2.4)$$

где $S_0 = \frac{8 \cdot \lambda}{g \cdot \pi^2 \cdot D^5}$ – удельное сопротивление трубопровода, зависящее от ее

диаметра D и гидравлического коэффициента сопротивления λ .

Их опытных данных [62] известно, что величина $q_p = \sqrt{Q_0^2 + Q_0 Q_k + Q_k^2}$, называемая расчетным расходом, приближенно может быть представлена в виде:

$$q_p = Q_k + \beta \cdot l \cdot q_0, \quad (2.5)$$

где q_0 – средняя удельная раздача воды на единице длины трубопровода; β – коэффициент, характерный для данного участка трубопровода ($0,5 < \beta < 0,58$).

Система автоматического управления ПНС и ВУ обеспечивает поддержание постоянного давления на выходе из насосных станций и тем самым стабилизирует в определенном диапазоне колебания расхода Q_0 . Кроме этого, определяемые при мониторинге расходы воды Q_0, Q_k, Q_p , однозначно связаны балансовым уравнением вида $Q_0 = Q_k + Q_p$. Поэтому, учитывая уравнение (2.5), зависимость (2.4) может быть приближенно представлена через расход Q_k следующим образом:

$$\Delta h(t) = P_2(t) - P_1(t) = \alpha(S_0, l) \cdot Q_k^2(t), \quad (2.6)$$

где α – некоторый характерный для данного трубопровода коэффициент, который может определяться по данным мониторинга технологических параметров, $\alpha = \frac{\Delta h(t)}{Q_k^2(t)}$.

Таким образом, информационные базы данных, создаваемые при

мониторинге режимов, предполагают сбор данных как минимум по трем технологическим показателям работы – давление воды на линии входа в участок водораспределительной сети, расход и давление воды на выходе из участка (в контрольной точке).

Так как расходы воды на контрольном участке обычно имеют явно выраженные корреляционные связи, то при решении практических задач выражение для потерь напора по длине длинного трубопровода можно представить в виде:

$$\Delta h = P_2(t) - P_1(t) = S_0 \cdot Q^2(t) \cdot l, \quad (2.7)$$

где $Q(t)$ – расход воды в некоторой контрольной точке системы мониторинга; l – длина трубопровода; $P_2(t), P_1(t)$ – давление воды на выходе и входе в участок трубопровода.

Для эксплуатируемых участков сетей трубопроводов с установившимися режимами расход воды будет определяться давлением воды на входе в трубопровод, поэтому зависимости изменения напора для участков сети можно искать по экспериментальным данным среди функций вида:

$$\Delta h = P_2(t) - P_1(t) = F[(P_1(t))], \quad (2.8)$$

В результате исследований было установлено, что расчетные модели для участков трубопроводов системы водоснабжения, определяющие напорные характеристики, могут быть заменены простыми линейными регрессионными моделями с достаточно высокими коэффициентами корреляции вида:

$$\Delta h(t) = a \cdot P_1(t) + b. \quad (2.9)$$

Для примера на рисунке 2.13 показана характерная зависимость потери напора воды на участке от давления воды на входе в изучаемый участок, длина которого составляет 3,5 км.

Таким образом, в регулируемых водораспределительных системах, где водопроводные узлы и подкачивающие насосные станции в течении суток обеспечивают жестко заданные технологические режимы, потери напора на конечных участках линейны относительно давления воды на входе в участок [83].

В таблице 2.5 приведены регрессионные модели для различных участков водораспределительных сетей Киевского района г.Донецка, а на рисунках 2.14 – 2.16 показаны характерные зависимости потери напора участков водораспределительных сетей от давления воды на входе в участок.

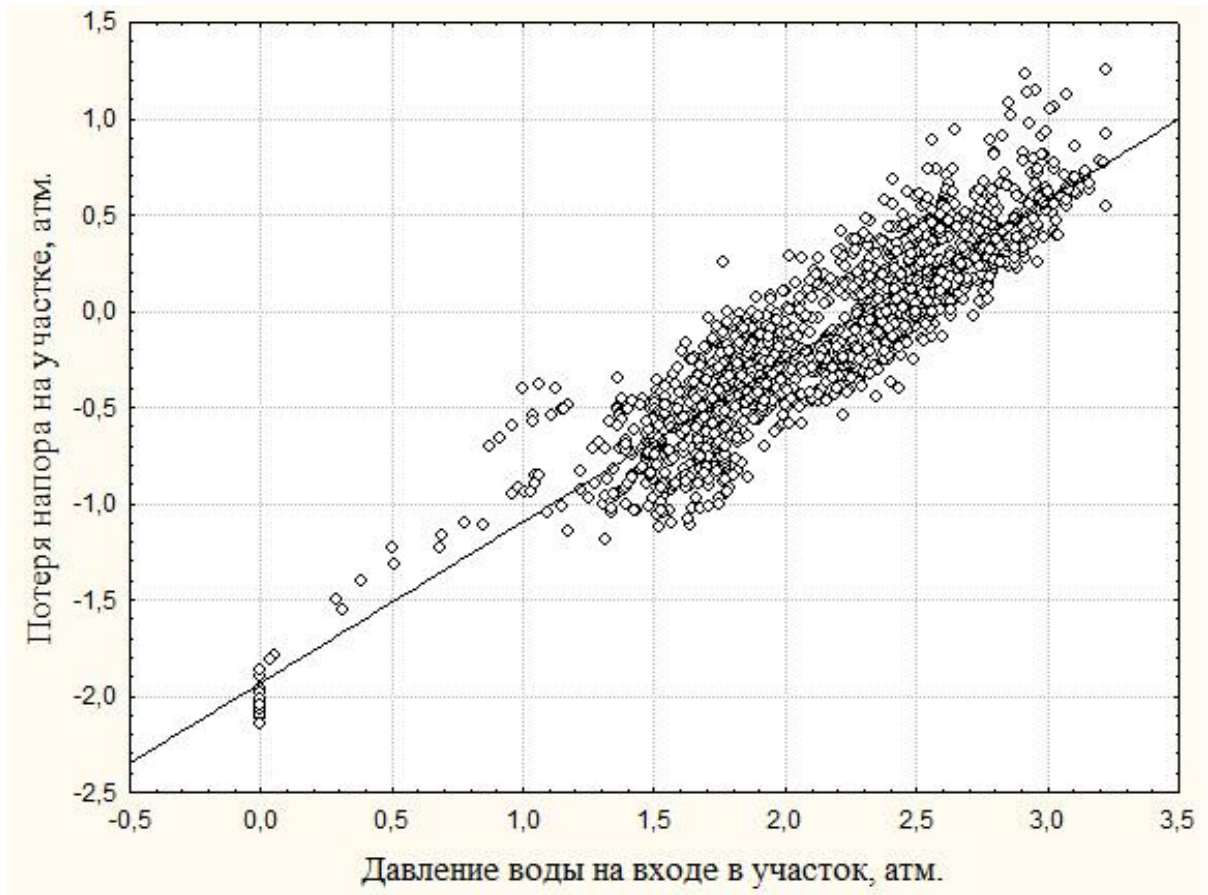


Рисунок 2.13 – Зависимость потери напора воды на участке квартал 268 – квартал 196 от давления воды на входе в участок

Из рисунка 2.14 видно, что для очень длинных участков, например, квартал 268 – квартал 735, разброс точек существенно увеличивается и приводит к уменьшению коэффициента корреляции регрессионной зависимости. Длина участка сети между ПНС квартал 268 – квартал 735 составляет 4,2 км. Длина трубопровода квартал 268 – квартал 238 составляет 3,5 км и разброс точек меньше. В свою очередь, высокий коэффициент корреляции зависимости (2.9) для участка водораспределительной сети между ПНС квартал 268 – ул. Стратонавтов

(Рисунок 2.16) объясняется относительно коротким трубопроводом длиной 2,3 км. Естественно, что разброс точек на рисунках определяется как длиной трубопроводов, так их состоянием, наличием отложений на стенках, что влечет за собой увеличение гидравлического сопротивления трубопроводов.

Таблица 2.5 – Параметры регрессионных моделей для различных участков водораспределительных сетей Киевского района г. Донецка

№	Наименование участка сети	Регрессионная модель	Коэффициент корреляции
1	Квартал 268 – Квартал 196	$\Delta h = -1,930 + 0,836 \cdot P_1(t)$	0,931
2	Квартал 268 – Квартал 238	$\Delta h = -0,550 + 0,711 \cdot P_1(t)$	0,923
3	Квартал 268 – Квартал 735	$\Delta h = -2,708 + 0,925 \cdot P_1(t)$	0,632
4	Квартал 268– п.Шахтерский-1	$\Delta h = -1,987 + 1,150 \cdot P_1(t)$	0,980
5	Квартал 268– Киевский-1	$\Delta h = -0,789 + 0,479 \cdot P_1(t)$	0,750
6	Квартал 268– Киевский-2	$\Delta h = -4,871 + 0,829 \cdot P_1(t)$	0,910
7	Квартал 268– Киевский-4	$\Delta h = -1,127 + 0,492 \cdot P_1(t)$	0,681
8	Квартал 268– Управление ЖД	$\Delta h = -0,805 + 0,733 \cdot P_1(t)$	0,695
9	Квартал 238– Киевский-2	$\Delta h = -4,723 + 0,559 \cdot P_1(t)$	0,643
10	Квартал 238– Киевский-4	$\Delta h = -1,852 + 0,679 \cdot P_1(t)$	0,621
11	Домостроитель– Квартал 735	$\Delta h = -2,764 + 0,974 \cdot P_1(t)$	0,795
12	Управление ЖД– Квартал 735	$\Delta h = -2,930 + 1,052 \cdot P_1(t)$	0,830

Таким образом, на основе данных мониторинга эксплуатационных режимов городской водораспределительной системы могут быть установлены закономерности изменения технологических параметров протяженных участков сетей трубопроводов [83].

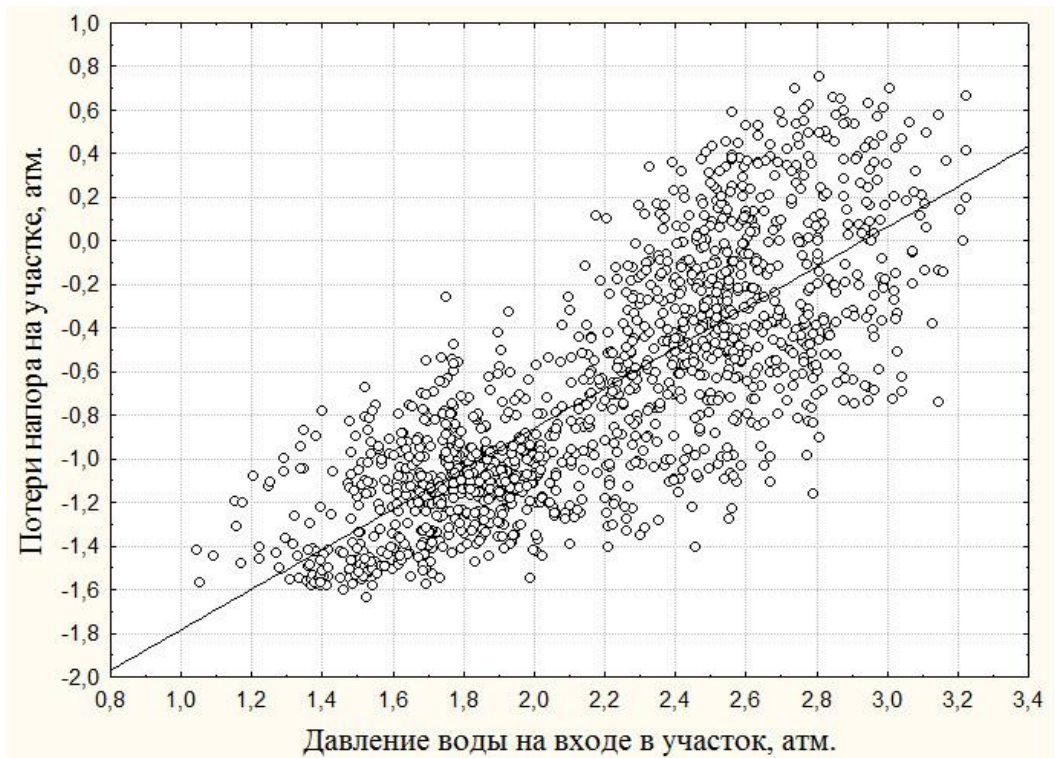


Рисунок 2.14 – Зависимость потери напора воды на участке квартал 268 – квартал 735 от давления воды на входе в участок

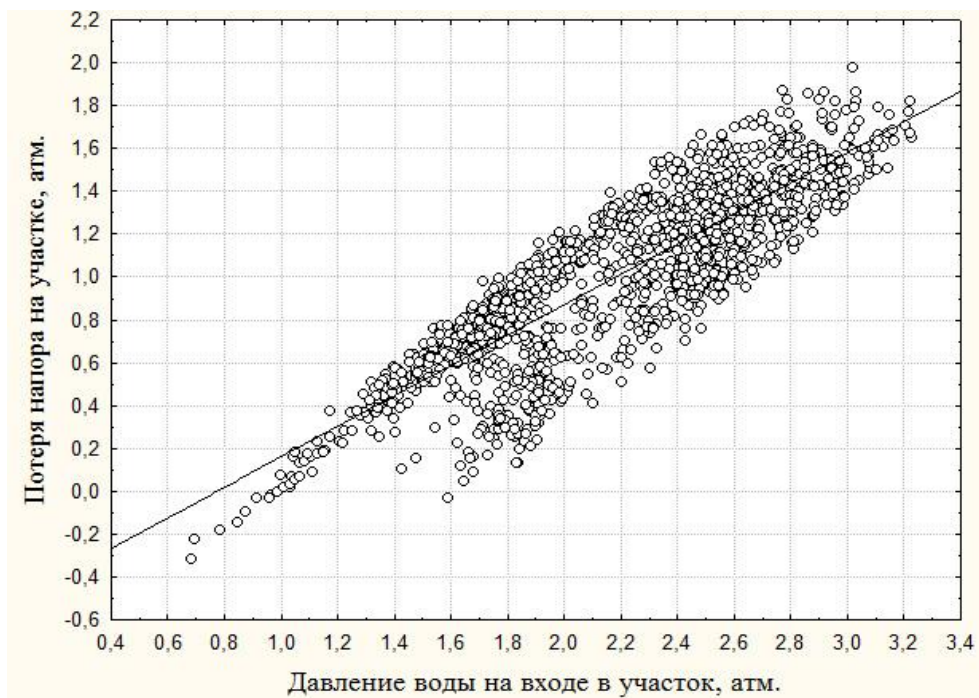


Рисунок 2.15 – Зависимость потери напора воды на участке квартал 268 – квартал 238 от давления воды на входе в участок

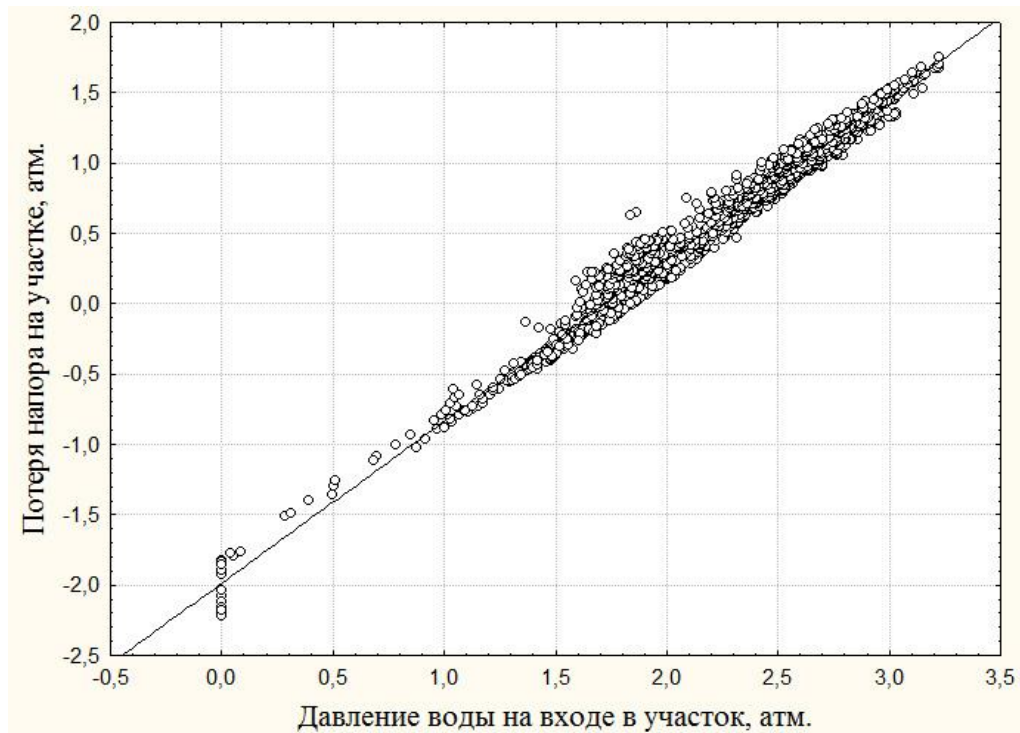


Рисунок 2.16 – Зависимость потери напора воды на участке квартал 268 – ул. Стратонавтов от давления воды на входе в участок

2.4.3 Регрессионные модели режимов работы водораспределительных сетей

Источником информации являются датчики давления, расположенные на насосных станциях. А также автономные системы измерения давления, расположенные в контрольных точках на водоводах сети. В рамках данной работы через x_i ($i=1, \dots, 5$) обозначены показатели давления воды на насосных станциях, через y_j ($j=1, 2, 3$) – на сетях.

Замеры производились автоматически каждые 30 мин с передачей на сервер центральной диспетчерской по GPRS-каналу.

Временное окно полученных данных: с 14.02.2012 по 30.07.2012.

При решении поставленной задачи были выполнены следующие работы:

- проведен разведочный анализ данных для выявления выбросов и пропущенных значений, а также наличия связи между переменными;

- используя методы регуляризации для обеспечения надежности и эффективности оценок параметров регрессии в условиях мультиколлинеарности, построены модели множественной регрессии: гребневая и лассо-регрессия;
- построена модель регрессии на главные компоненты для отбора информативных факторов и комбинаций предикторов, позволяющую сократить количество предикторов и устранить их мультиколлинеарность;
- произведена оценка статистической значимости моделей, используя критерии качества полученных моделей такие как среднеквадратичная ошибка регрессии, коэффициент детерминации и дисперсионное отношение Фишера;
- произведен сравнительный анализ эффективности построенных моделей при прогнозировании, оценивая средний квадрат ошибки прогноза на данных из тестовой выборки.

Для оценки степени мультиколлинеарности m -мерного комплекса переменных были выполнены вычисления фактора инфляции дисперсии [33,40].

В присутствии мультиколлинеарности дисперсия оценок параметров модели возрастает пропорционально величине [105]: $VIF_j^o = 1/(1 - R_j^2)$. VIF_j (variance inflation factor) – фактор инфляции дисперсии, чем он выше для j -го предиктора, тем сильнее линейная связь между этим и остальными предикторами. В приведенной выше формуле R_j^2 – коэффициент детерминации j -го предиктора относительно остальных.

Для выявления мультиколлинеарности по матрице наблюдений W и значениям переменной-отклика были построены m регрессионных моделей, из которых исключалось по одному предиктору, после чего для каждого j -го предиктора были вычислены коэффициенты детерминации и рассчитаны факторы инфляции дисперсии VIF_j , которые, в свою очередь сравнивались с порогом, равным 2.

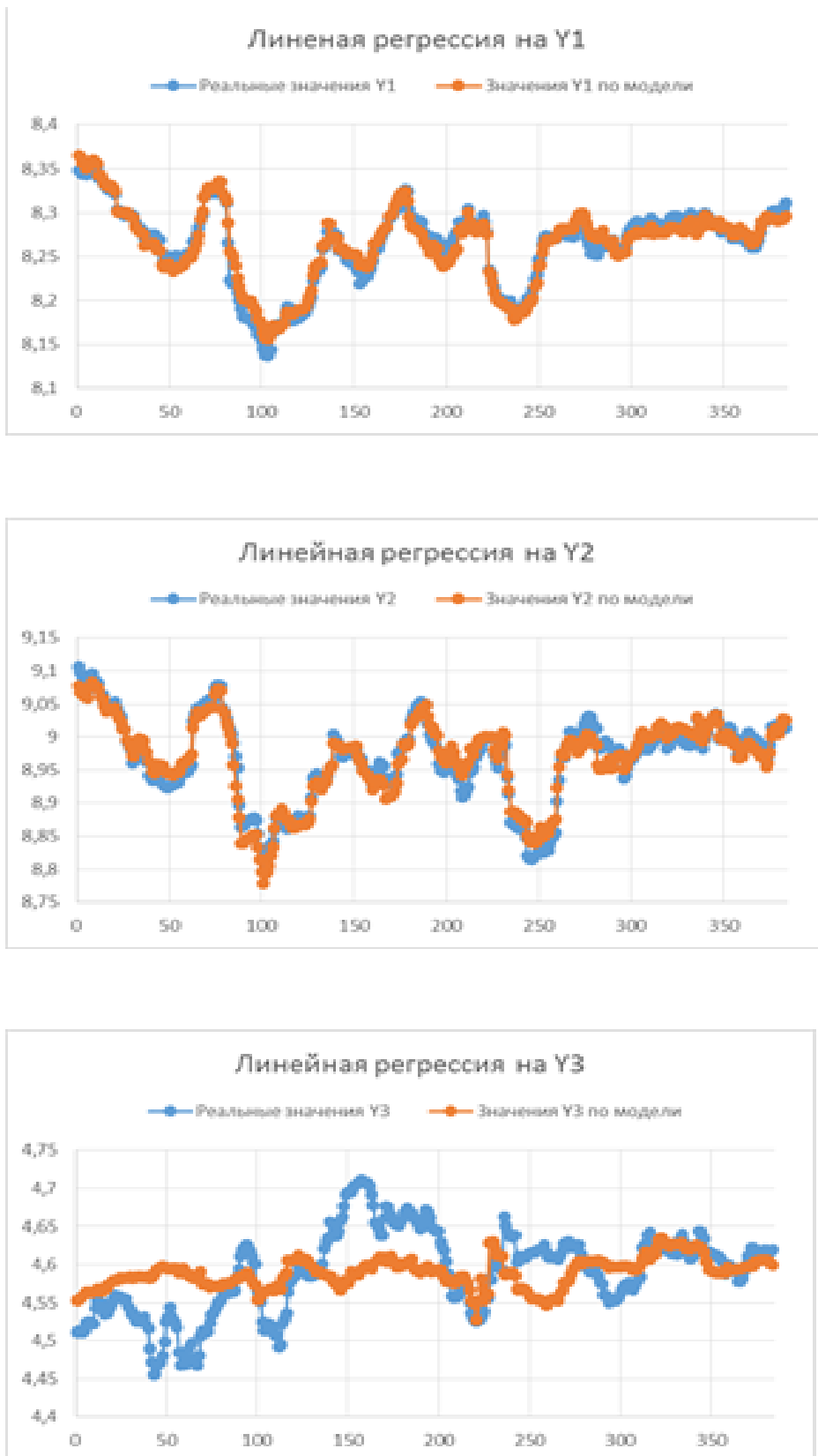


Рисунок 2.17 – Временные ряды предсказанных по модели линейной регрессии и реальных значений переменной Y1, Y2, Y3

Полученные показатели сведены в таблицы 2.6-2.8

Таблица 2.6 – Значения VIF для моделей линейной регрессии для переменной-отклика Y1

X1	X2	X3	X4	X5	Y2	Y3
1.730062	326.2375	39.3474	135.7604	34.740705	1.789938	1.262520
Исключаем X2						
1.394129	-	25.220946	40.413645	13.340509	1.631141	1.215943
Исключаем X4						
1.387783	-	8.474067	-	7.687832	1.600710	1.172038
Исключаем X3						
1.357981	-	-	-	1.893205	1.480917	1.074341

Таблица 2.7 – Значения VIF для моделей линейной регрессии для переменной-отклика Y2

X1	X2	X3	X4	X5	Y1	Y3
1.712758	337.235056	39.315573	140.717604	37.661498	2.421308	1.247474
Исключаем X2						
1.368758	-	25.165536	41.083279	14.093022	2.142676	1.203471
Исключаем X4						
1.374102	-	8.109117	-	7.940405	2.061502	1.158141
Исключаем X3						
1.342365	-	-	-	2.432141	1.990933	1.085703

Данные были разбиты на обучающую и тестовую выборки (доля обучающей выборки – 0.8). После чего были построены регрессионные модели, в качестве переменной-отклика поочередно брались Y_j ($j = 1, 2, 3$).

Таблица 2.8 – Значения VIF для моделей линейной регрессии для переменной-отклика Y_3

X1	X2	X3	X4	X5	Y1	Y2
1.65342	325.43838	38.72584	131.80648	41.11208	24.29518	18.37282
Исключаем X2						
1.364954	-	22.921622	40.572688	17.519282	23.841528	18.367246
Исключаем X4						
1.337824	-	8.169587	-	10.035198	22.953273	17.884261
Исключаем Y1						
1.312449	-	7.575422	-	7.802637	-	1.522853
Исключаем X5						
1.283727	-	1.860086	-	-	-	1.516931

Из визуального анализа графиков можно сделать вывод о непригодности модели линейной регрессии (2.12) для Y_3 , а также об эффективности моделей (2.10) и (2.11).

Гребневая регрессия (ridge regression) реализует классическую L_2 -регуляризацию Тихонова, при которой оценки параметров модели β_i находят из условия минимизации СКО (среднее квадратическое отклонение) оценок параметров модели регрессии [107]:

$$\hat{\beta} = \arg \min \left[\sum_{i=1}^n \left(z_i - \sum_{j=1}^m \beta_j w_{ij} \right)^2 + \lambda \sum_{j=1}^m \beta_j^2 \right].$$

где $z = \{y_i\}_{i=1}^n$ - имеющиеся наблюдения переменной-отклика;
 $w^i = (w_1^i, \dots, w_m^i)$ - значения предикторов i -го объекта обучающей выборки, n - количество наблюдений, m - количество предикторов.

Модели гребневой регрессии имеют вид, описываемый формулами (2.13)–(2.15):

$$Y1 = 0.026935209 X1 - 0.495355311 X2 + 0.111965296 X3 + 0.060571464 X4 + 0.538728237 X5 + 0.586891343 Y2 - 0.006001552 Y3 + 2.295470545 \quad (2.13)$$

$$Y2 = -0.04274227 X1 + 0.29505350 X2 + 0.02355006 X3 + 0.09996256 X4 - 0.67215631 X5 + 1.54099163 Y1 + 0.02994147 Y3 - 3.01774940 \quad (2.14)$$

$$Y3 = 0.2000331 X1 - 3.3500077 X2 - 0.7256510 X3 + 2.9943899 X4 + 0.8500513 X5 - 0.1612681 Y1 + 0.3064189 Y2 - 2.9716366 \quad (2.15)$$

На рисунке 2.18 приведены временные ряды предсказанных по моделям гребневой регрессии значений $Y1$ - $Y3$ и их реальных значений, взятых из тестовой выборки.

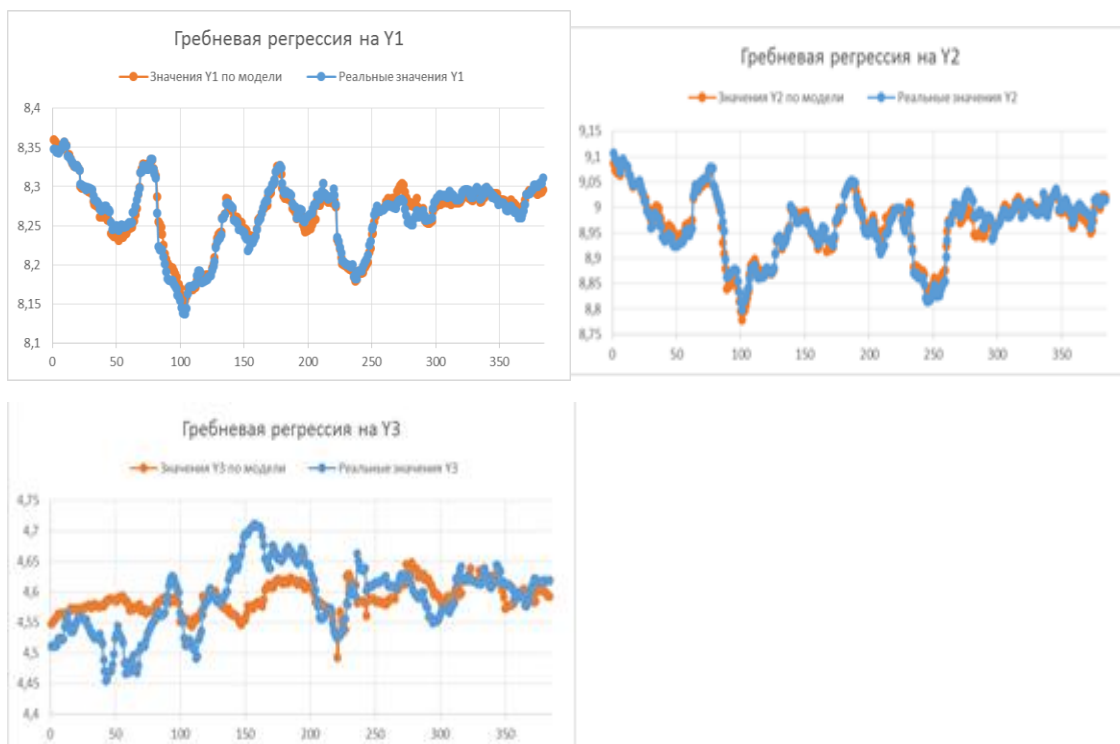


Рисунок 2.18 – Временные ряды предсказанных по модели гребневой регрессии значений и реальных значений для переменной $Y1$, $Y2$, $Y3$

Исходя из визуального анализа, можно сделать вывод о плохом качестве модели гребневой регрессии для предсказания Y_3 .

Лассо-регрессия (LASSO, от англ. Least Absolute Shrinkage and Selection Operato) реализует иной подход к определению параметров множественной регрессии, когда на основе матрицы парных коэффициентов корреляции строится уравнение регрессии в стандартизованном масштабе, т.е. в модели вместо исходных значений переменной отклика z и предикторов w_j берутся их стандартизированные значения z^0, w_j^0 , для которых среднее значение равно нулю, а СКО равно единице.

Модели лассо-регрессии совпадают с моделями гребневой регрессии и имеют вид, описываемый формулами (2.13) - (2.15).

Для повышения результативности анализа многомерных данных большой эффект даёт снижение их размерности через выделение лидирующих факторов и комбинаций признаков. **Анализ главных компонент** (PCA, principal component analysis) является классическим методом снижения размерности данных, широко используемым в различных областях науки и техники и детально описанным в многочисленных руководствах [109,112].

РСА выполняет симметричную обработку всей матрицы наблюдений. При этом алгоритм стремится построить небольшое количество ортогональных плоскостей, ориентируя их относительно максимума вариации точек отображаемых объектов, т. е. при проецировании на эти плоскости вносятся минимально возможные искажения в геометрию исходных данных. Ранжирование по дисперсии осей найденных латентных переменных позволяет выполнить поиск такой u -мерной системы координат ($m > u$), которая содержит сжатое описание структурной зависимости исследуемой системы признаков X небольшим числом u факторов и без существенной потери информации. Результатом РСА-анализа конкретной матрицы наблюдений W размерностью $(n \times m)$, где n – число наблюдаемых объектов, m – число независимых переменных, является матрица T счетов (scores) размерностью $n \times u$, содержащая проекции исходных точек выборки W в новом u -мерном базисе.

Другая матрица P размерностью $(u \times m)$ содержит нагрузки, обеспечивающие пересчет данных из m -мерного пространства исходных переменных в u -мерное пространство главных компонент. Каждая k -я строка матрицы P состоит из оценок коэффициентов p_{ik} , показывающих долю участия каждой i -й переменной из w_1, \dots, w_m в формировании k -й главной компоненты. Фактически это – проекция предиктора w_j на новую k -ю ось. Анализируя таблицу нагрузок, можно понять, какие исходные переменные связаны между собой, а какие независимы, и объяснить предметный смысл k -го предиктора.

Снижение размерности исходного пространства методом PCA можно представить, как последовательный, итеративный процесс, который можно оборвать на любом шаге u . При этом важно знать, когда следует остановиться, т.е. определить «правильное» число главных компонент u . Обычно ориентируются на последовательность $\lambda_1, \dots, \lambda_m$ собственных значений матрицы ковариаций предикторов и принимают решение, сколькими главными осями стоит ограничиться. Например, для интерпретации считается достаточным число осей u , объясняющих 75% дисперсии в исходных данных.

Результаты вычислений доли объясненной вариации данных показали, что первые главные компоненты объясняют 58-65%, а все три – более 92%. Можно сделать вывод, что для моделей регрессии на главные компоненты достаточно 3-х главных компонент.

В таблице 2.9 представлены нагрузки на главные компоненты. Жирным выделены максимальные нагрузки для каждой компоненты. Анализируя таблицу, можно предположить, что первые главные компоненты для всех трех моделей связаны с наблюдаемыми переменными X1 и X3, вторые – с переменной X1.

Таблица 2.9 - Факторные нагрузки на главные компоненты

Переменная Y1			
	Comp 1	Comp 2	Comp 3
X1	0.534889	0.7994	0.005413
X2	0.398771	-0.1692	0.120405
X3	0.412480	-0.2179	0.129931
X4	0.386992	-0.1816	0.096542
X5	0.364031	-0.1692	0.081301
Y2	0.320020	-0.4282	-0.552238
Y3	-0.006545	0.1998	-0.804794
Переменная Y2			
	Comp 1	Comp 2	Comp 3
X1	0.55970	0.7806	0.25753
X2	0.40306	-0.2303	-0.03765
X3	0.41448	-0.2767	-0.02087
X4	0.39016	-0.2368	-0.06485
X5	0.36808	-0.2223	-0.07981
Y1	0.25419	-0.2000	-0.30399
Y3	-0.01278	0.3398	-0.91041
Переменная Y3			
	Comp 1	Comp 2	Comp 3
X1	0.4858	0.79946	0.3526
X2	0.3825	-0.07176	-0.3279
X3	0.3974	-0.11376	-0.3217
X4	0.3719	-0.08859	-0.3197
X5	0.3512	-0.08713	-0.2885
Y1	0.2830	-0.29908	0.3277
Y2	0.3435	-0.48773	0.6098

Модели PCA-регрессии имеют вид, описываемый формулами (2.16) - (2.18):

$$Y1 = 0,270468 \text{ Comp1} - 0,273705 \text{ Comp2} - 0,314577 \text{ Comp3} + 3,04795233 \quad (2.16)$$

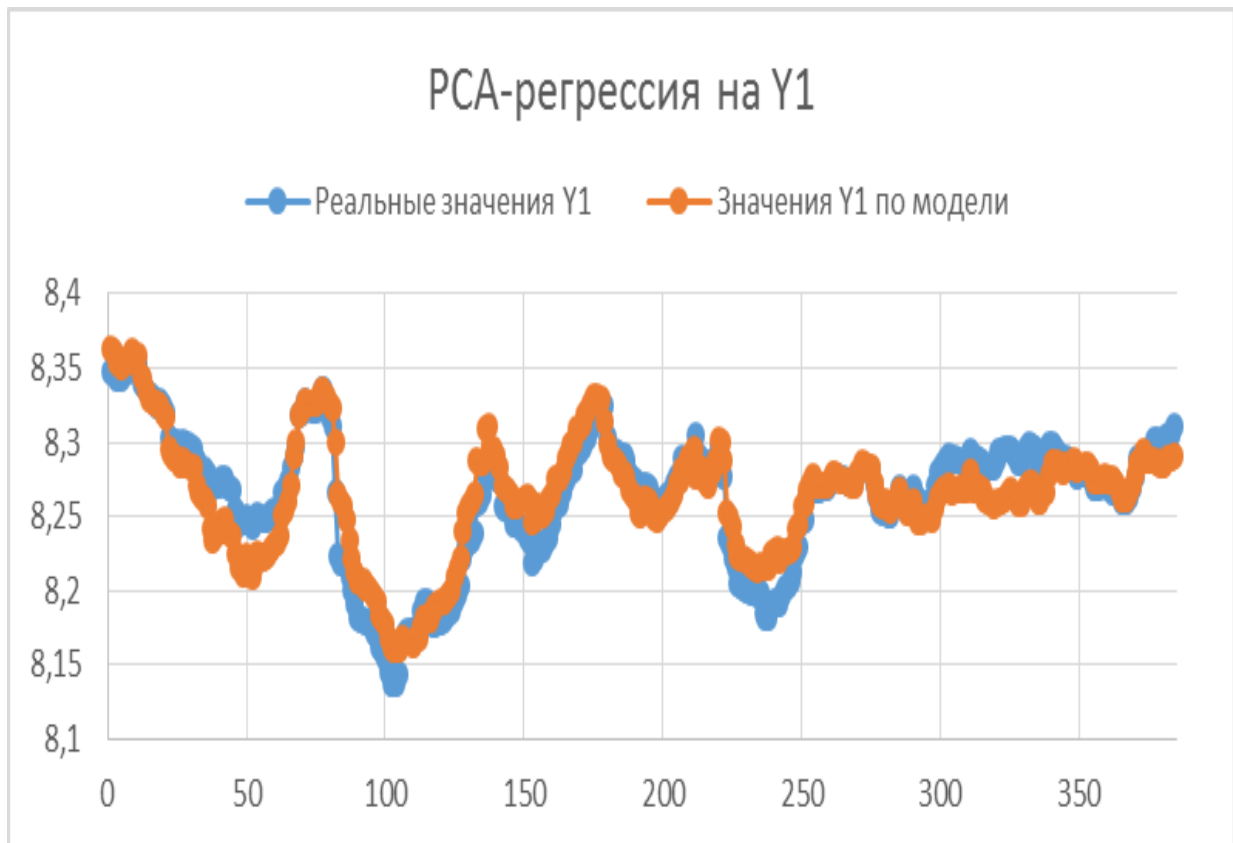
$$Y2 = 0,287668 \text{ Comp1} - 0,280072 \text{ Comp2} - 0,471153 \text{ Comp3} + 3,843464683 \quad (2.17)$$

$$Y3 = -0,0006908 \text{ Comp1} + 0,0423181 \text{ Comp2} +$$

$$+ 0,3337942 \text{ Comp3} + 2,662009237 \quad (2.18)$$

На рисунке 2.19 приведены временные ряды предсказанных по моделям регрессии на главные компоненты значений Y_1 - Y_3 и их реальных значений, взятых из тестовой выборки.

Исходя из визуального анализа, можно сделать вывод о плохом качестве модели PCA-регрессии на Y_2 и Y_3 .



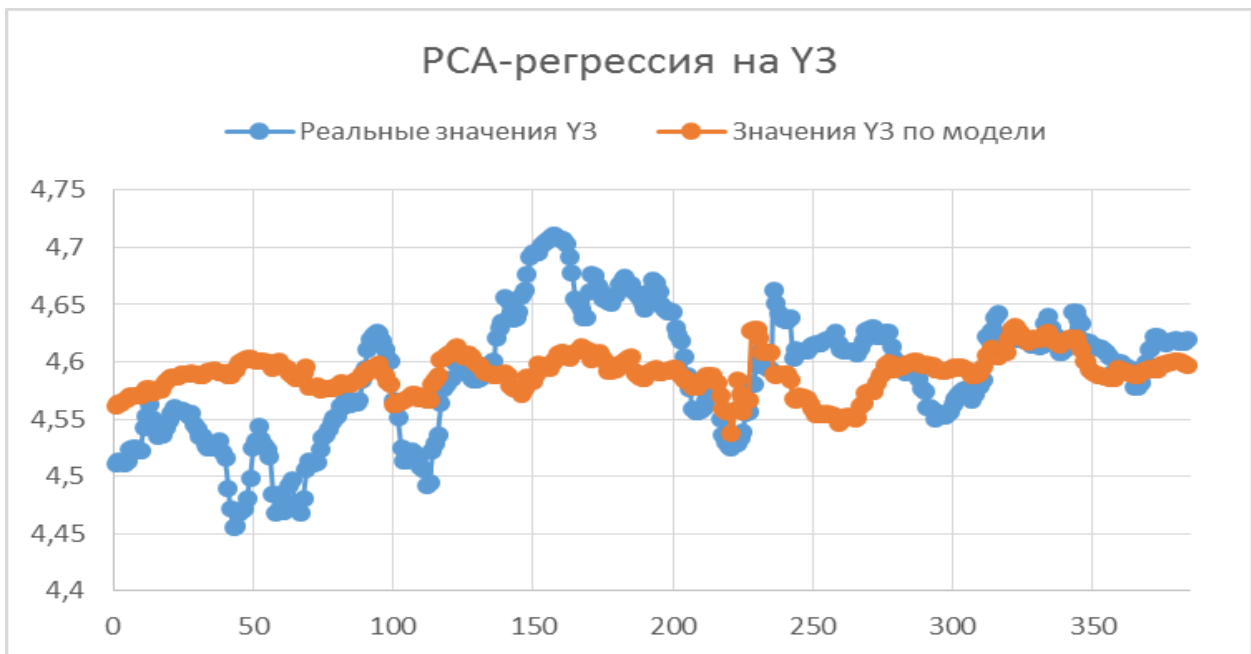
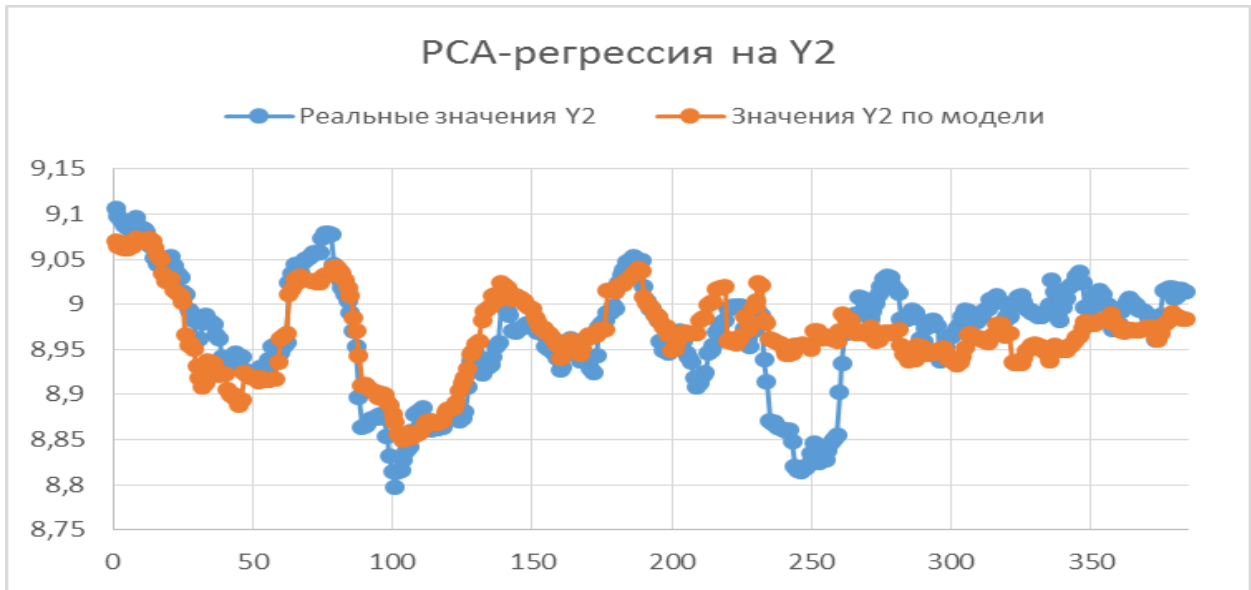


Рисунок 2.19 – Временные ряды предсказанных по модели PCA-регрессии значений и реальных значений для переменной Y1, Y2, Y3

Для проведения *сравнительного анализа качества полученных моделей* рассмотрим количественные показатели, отражающие разные аспекты качества регрессионных моделей. Введем следующие обозначения: $\hat{\varepsilon}_i$ – отклонения выборочных величин z_i переменной-отклика от значений \hat{z}_i , получаемых по

уравнению регрессии, \bar{z} – среднее значение переменной-отклика z , n – объем выборки, k – количество параметров модели.

Общая сумма квадратов, TSS, отражает общий разброс значений зависимой переменной без учета регрессионной модели: $TSS = \sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2$.

Сумма квадратов остатков, RSS, является оценкой остаточной дисперсии значений переменной-отклика, которую не удалось объяснить при помощи построенной модели: $RSS = \sum_{i=1}^n \hat{\varepsilon}_i^2$.

RSE – стандартное отклонение остатков модели, является оценкой разброса наблюдаемых значений зависимой переменной относительно истинной линии регрессии. RSE в общем виде рассчитывается как

$$RSE = \sqrt{RSS/(n-k-1)}.$$

Коэффициент детерминации R^2 измеряет долю общей дисперсии зависимой переменной, объясненную моделью, и изменяется от 0 до 1. Чем ближе значение R^2 к 1, тем точнее модель описывает данные: $R^2 = 1 - RSS/TSS$.

Дисперсионное отношение Фишера (F-статистика) представляет собой отношение дисперсий и используется для проверки нулевой гипотезы о статистической незначимости уравнения регрессии в целом:

$$F = \frac{(TSS - RSS)/k}{RSS/(n-k-1)}.$$

Современные подходы к выбору хорошо интерпретируемых моделей оптимальной сложности ориентируются на применение информационных критериев, основанных на функции максимального правдоподобия и более чувствительных к увеличению числа параметров модели. В данной работе для сравнения моделей с разным числом параметров использовался информационный критерий Акаике: $AIC = n \cdot \ln(\sum \hat{\varepsilon}_i^2 / n) + 2k$.

В нашем случае сравнения моделей на выборках одинаковой длины выражение можно упростить, выкидывая члены, зависящие только от n :

$$AIC = n \cdot \ln(RSS) + 2k.$$

Считается, что наилучшей будет модель с наименьшим значением критерия *AIC*.

Для предсказания Y_1 - Y_3 нами были получены следующие регрессионные модели: линейная регрессия с исключёнными коллинеарными предикторами, гребневая и лассо-регрессия, которые совпали, а также регрессия на главные компоненты. Все модели имеют разное число параметров. Качество полученных моделей оценим по тестовой выборке по критериям, описанным во втором разделе. Результаты исследования качества моделей сведены в таблицу 2.10.

Таблица 2.10 – Значения качественных показателей для полученных моделей.

Линейная регрессия с неколлинеарными предикторами						
Переменная-отклик	TSS	RSS	RSE	R2	F-статистика	AIC
Y1	0,7571646	0,0374452	0,00995303	0,9998032	887,4882336	-1251,3923
Y2	1,5441833	0,0961286	0,01594705	0,9377479	690,7173013	-889,35421
Y3	1,14979782	1,0208347	0,0518989	0,1121616	1,613796285	15,918314
Гребневая (лассо-) регрессия						
Y1	0,7571646	0,03335648	0,00943136	0,9998247	569,6517658	-1289,7932
Y2	1,5441833	0,0846401	0,01502355	0,9451878	450,077109	-932,22910
Y3	1,1497978	0,9341717	0,04991112	0,187534	1,957935321	-10,148492
РСА-регрессия						
Y1	0,7571646	0,11307461	0,01727281	0,9994057	331,6448884	-829,00766
Y2	1,5441833	0,7413971	0,04422887	0,5198775	46,91414772	-106,90006
Y3	1,1497978	1,0568418	0,05280626	0,0808455	0,833339677	29,2294581

Из значений критериев качества, приведенных в таблице 2.10, можно заключить следующее:

а) для моделей с переменной-откликом Y_1 и Y_2 :

- все модели статистически значимы в целом, поскольку значение F -статистики гораздо больше 1, что соответствует p -значению $< 1.032e-15$;
- наиболее значимой по значению критерия АІС является модель гребневой регрессии;
- наихудшей из рассмотренных моделей является РСА-регрессия;
- значение R^2 для РСА-регрессии на Y_2 близко к 0.5, это свидетельствует о том, что модель может не отражать реальное положение вещей;

б) для моделей с переменной-откликом Y_3 :

- все модели имеют низкие коэффициенты детерминации, что не позволяет использовать их для предсказания Y_3 ;
- значение F -статистики ниже критического на уровне значимости $\alpha = 0.05$, следовательно, принимается нулевая гипотеза о статистической незначимости уравнения регрессии в целом;
- наилучшей для предсказания Y_3 среди рассмотренных моделей является гребневая регрессия [19].

2.4.4 Напорные и энергетические характеристики систем водоподачи при регулировании технологических режимов

Построение характеристик систем водоподачи основывалось на изучении эксплуатационных режимов насосных агрегатов городской системы водоснабжения. С этой целью выбирались технологические объекты, имеющие средства управления насосным оборудованием и обеспечивающие подачу воды по распределительным сетям потребителям в соответствии с заданным графиком, который поддерживался в автоматическом режиме. Для анализа среди всех насосных агрегатов были выбраны 10 подкачивающих насосных станций и несколько насосных агрегатов водопроводных узлов. В процессе накопления массивов экспериментальных данных проводилось одновременное снятие значений давления воды ($P_{вх}, P_{вых}, атм$) в контрольных точках – на линиях входа

и выхода ПНС. Кроме этого одновременно снимались данные по следующим показателям – расход воды (Q , $м^3/час$), объем поданной воды (V , $м^3$), сила (I , A) и частота (ω , $Гц$) электрического тока, потребляемая электродвигателем насоса электрическая мощность (E , $кВт$) и т.д. Выборки данных охватывали периоды времени не менее одного месяца, временные интервалы снятия данных выбирались равными в 30 минут.

Принятые алгоритмы регулирования подачи воды потребителям в г. Донецке предполагают ступенчатое изменение давления воды – ночью на выходе ПНС, обеспечивающих водой многоэтажные дома, поддерживается давление воды на 0,7 – 0,8 атм меньше, чем в другое время суток. Снижение давления в течении суток позволяет снизить мощности насосов при обеспечении необходимых расходов воды днем и ночью. Кроме этого системы регулирования насосных агрегатов настроены на поддержание на выходе ПНС постоянного давления воды при ее подаче в сеть.

Анализ полученных данных показывает, что установление общепринятых характеристик системы «насос – сеть», когда характеристика сети представляется параболой в координатах «расход – напор», а характеристика насоса – нисходящей монотонной кривой, не представляется возможным. Это связано с тем, что при автоматическом регулировании система управления поддерживает постоянное давление при подаче воды в распределительную сеть. В свою очередь сеть обладает выраженной стохастичностью напорных и расходных характеристик, т.к. использование воды потребителями явно случайно в течении суток, хотя и подвержено определенным закономерностям. Все это приводит к тому, что в координатах «расход – напор» характеристика системы «насос – сеть» отображается случайным облаком точек, не позволяющим установить режимные характеристики в виде регрессионных зависимостей.

В данных условиях при построении характеристики напор, создаваемый в системе «насос – сеть», лучше увязать с внешним параметром – давлением воды на входе в ПНС. Установлено, что по опытным данным можно определить эмпирические зависимости, обладающие высокими коэффициентами корреляции.

На рисунках 2.20 и 2.21 представлены зависимости напора от давления воды на линии входа для двух различных ПНС. Как видно из рисунков, возможно построение линейных регрессионных зависимостей, определяющих режим работы в системе «насос – сеть» вида: обеспечиваемый напор – давление воды на входе в ПНС. Наличие нескольких зависимостей на рисунках объясняется различными давлениями, которые поддерживаются системой регулирования в ночном и дневном технологических режимах при подаче воды потребителям.

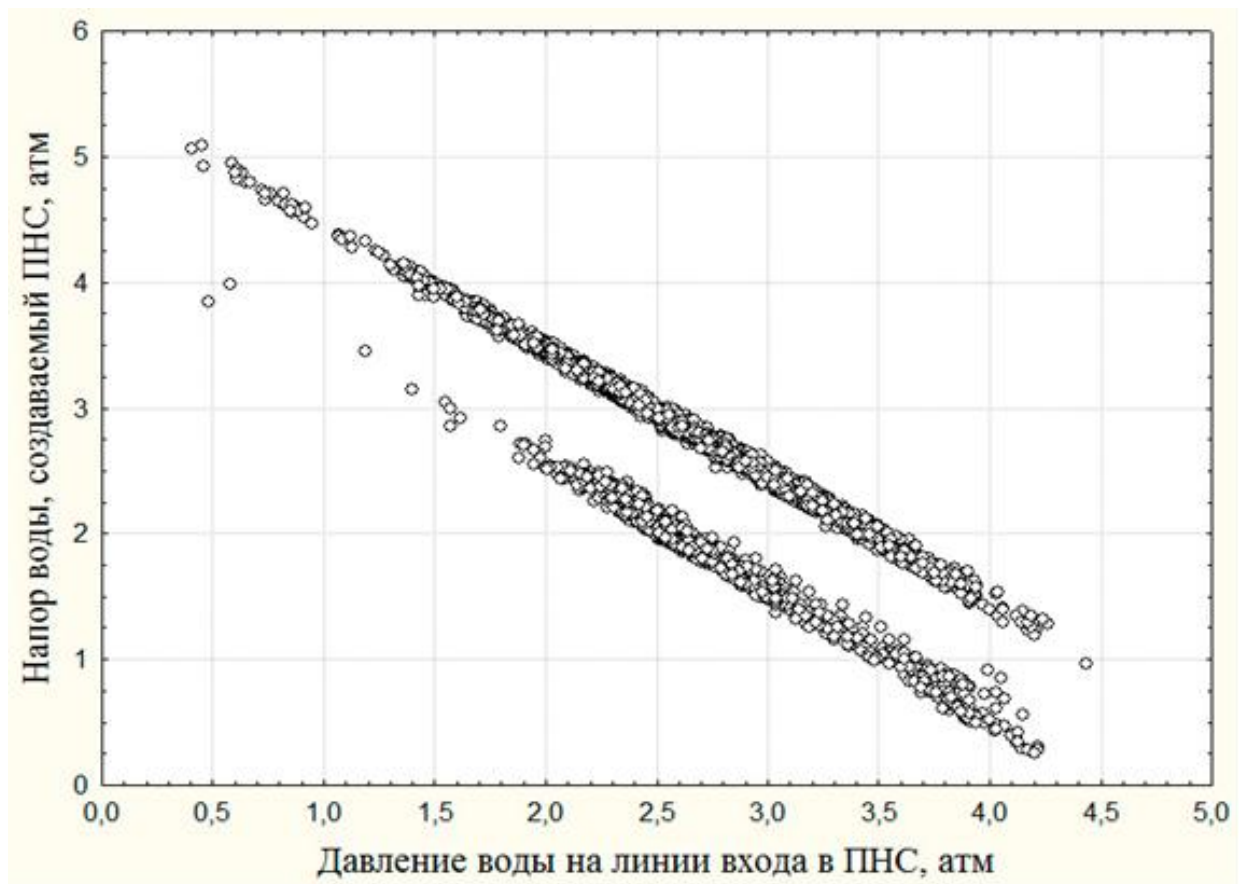


Рисунок 2.20 – Зависимость напора от давления воды на линии входа для ПНС квартал 219 – квартал 220

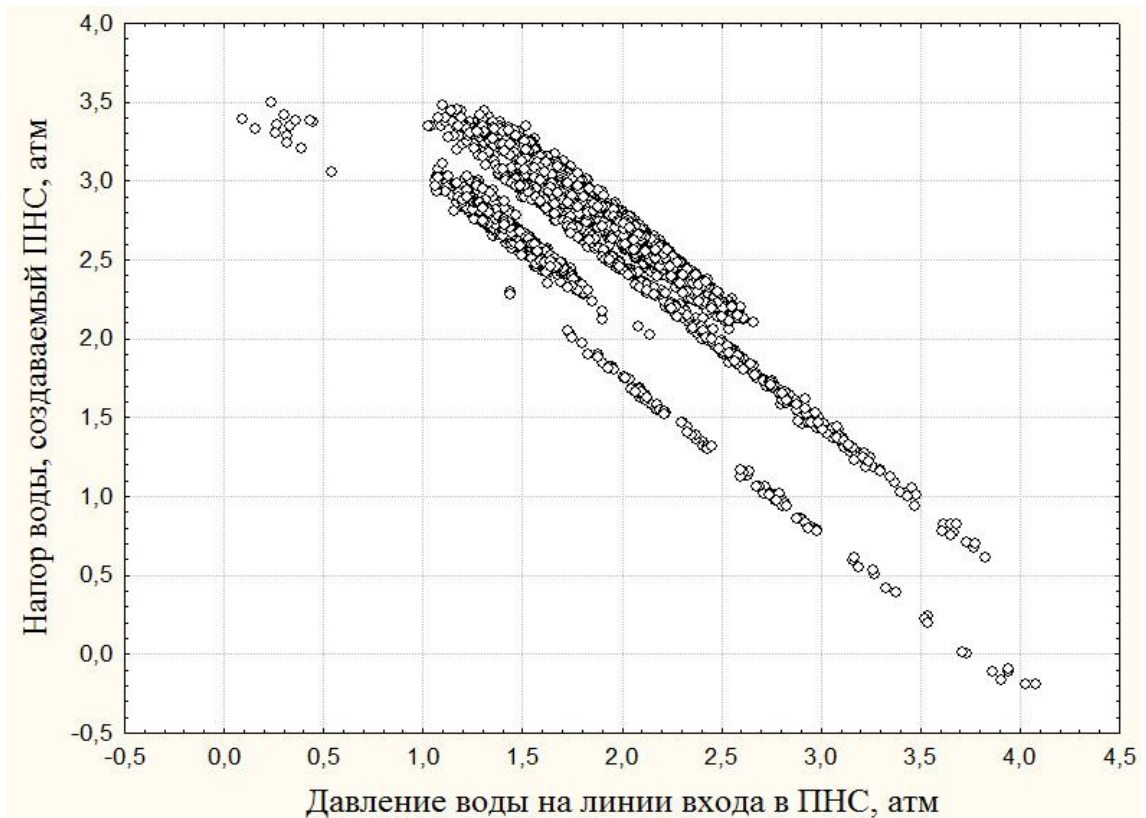


Рисунок 2.21 – Зависимость напора от давления воды на линии входа для ПНС ул. Прудовая

Зависимость мощности электродвигателей ПНС от гидравлической мощности насосов ($N = \rho \cdot g \cdot Q \cdot h$) имеет линейный вид, как это показано на рисунках 2.22 – 2.24. В случае, если регулирование осуществляется только изменением числа оборотов рабочего колеса насоса, то зависимости имеют вид, представленный рисунках 2.22 – 2.23. В свою очередь, если регулирование осуществляется изменением числа оборотов рабочего колеса при резком изменении гидросопротивления сети задвижкой, то зависимости имеют вид, представленный на рисунке 2.24. Разброс данных объясняется стохастическим изменением расхода воды, которая используется потребителями.

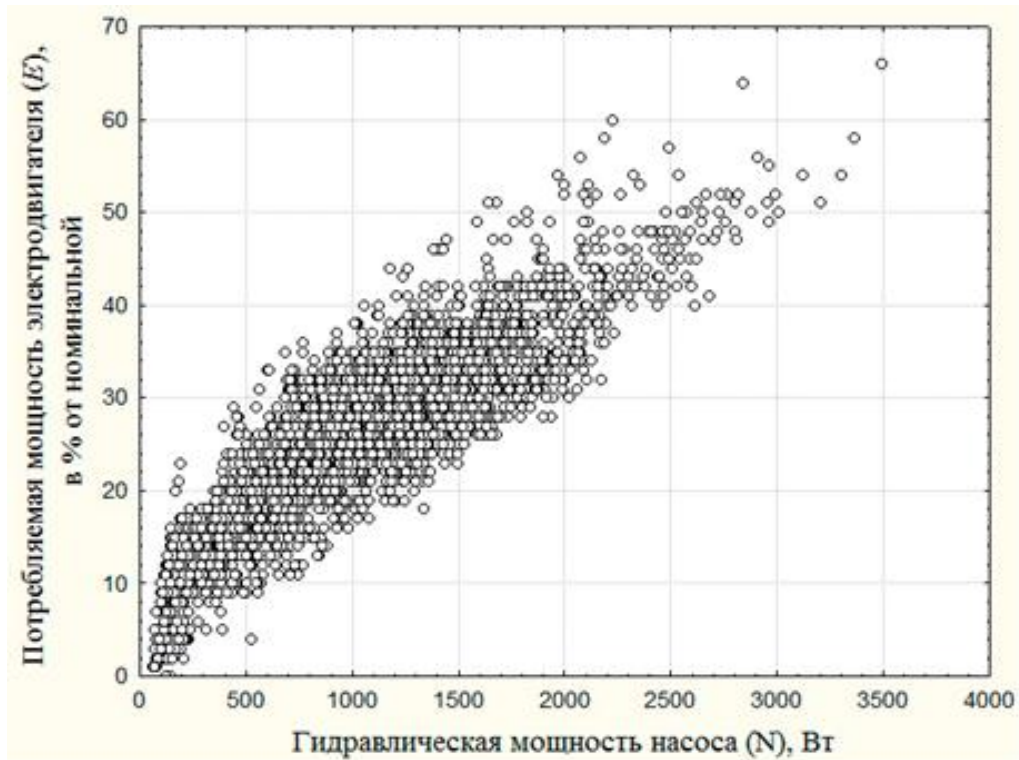


Рисунок 2.22 – Зависимость потребляемой мощности электродвигателя от гидравлической мощности насоса $N = \rho \cdot g \cdot Q \cdot h$ для ПНС квартал 219 – 220

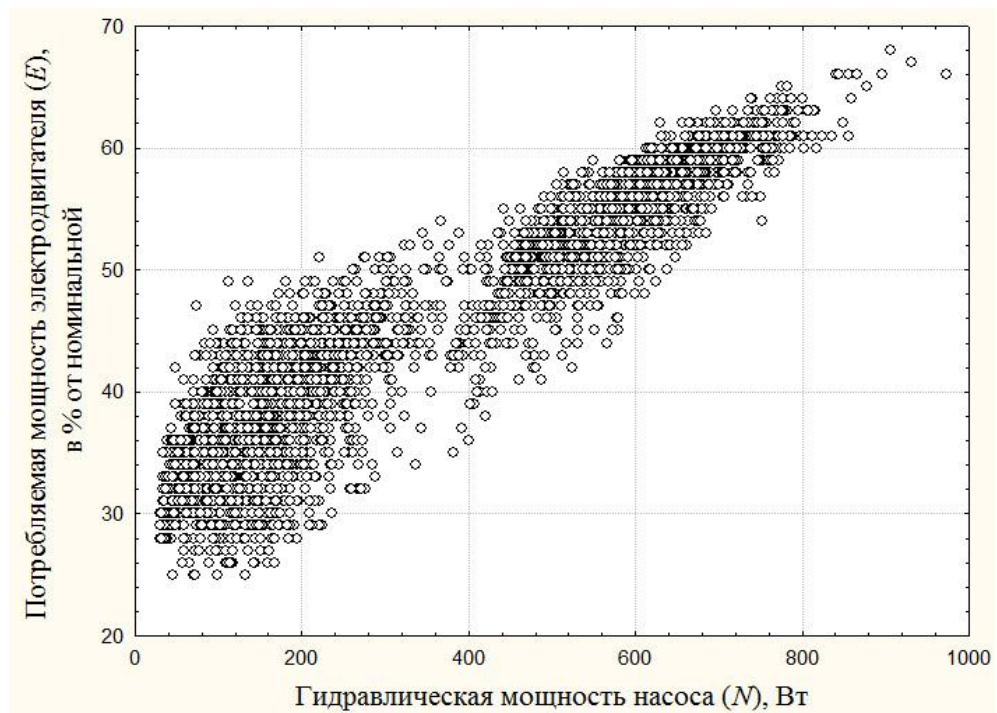


Рисунок 2.23 – Зависимость потребляемой мощности электродвигателя от гидравлической мощности насоса $N = \rho \cdot g \cdot Q \cdot h$ для ПНС ул. Делегатская

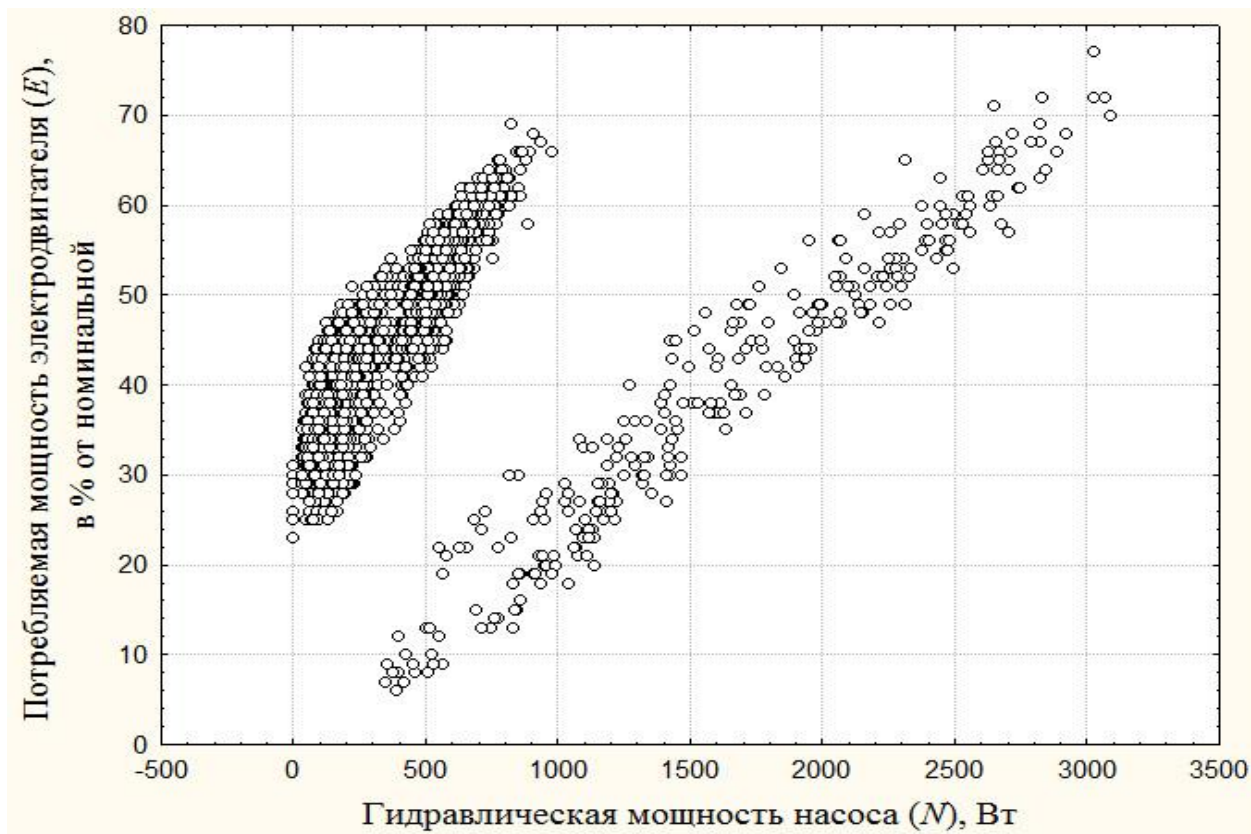


Рисунок 2.24 – Зависимость потребляемой мощности электродвигателя от гидравлической мощности насоса $N = \rho \cdot g \cdot Q \cdot h$ для ПНС ул. Прудовая

Установленные в данном разделе закономерности формирования режимов насосных агрегатов и водораспределительных сетей при автоматическом регулировании позволяют упростить математические модели для описания работы городской водораспределительной системы.

2.5. Выводы по разделу

На основе выполненных исследований получены следующие результаты.

- Предложены технические и программные решения, направленные на создание информационной многоуровневой АСУ водоснабжением города, имеющей множественные элементы технологического мониторинга и автоматического регулирования.

В течение нескольких лет технические и программные решения в области мониторинга технологических режимов прошли промышленную апробацию в системе водоснабжения Киевского района города Донецка. Это позволило создать базы данных ретроспективной и текущей информации для построения моделей системы водоснабжения.

Путем накопления информации в технологических базах данных получены исходные данные для разработки математических моделей, позволяющих описать режимы работы систем водоснабжения при автоматическом регулировании. Показано, что расчетные модели для объектов водоснабжения и водораспределения, определяющие напорные характеристики, могут быть представлены простыми регрессионными зависимостями одного временного ряда от другого. Преимуществом такого подхода является отказ от использования методов гидравлических и энергетических расчетов, которые требуют большого количества исходных данных, имеющих достаточно высокую погрешность и низкую достоверность.

- Был проведен разведочный анализ данных, выявлена мультиколлинеарность между переменными и выбран оптимальный состав предикторов для каждой переменной.

- Построены модели множественной регрессии: гребневая и лассо-регрессия. При этом модели, построенные с помощью метода лассо-регрессии, совпали с моделями, использующими гребневую регрессию.

- Построена модель с помощью регрессии на главные компоненты. Для повышения результативности анализа многомерных данных была снижена их размерность с использованием анализа главных компонент.

- Произведена оценка статистической значимости трех моделей и произведено сравнение эффективности построенных моделей при прогнозировании. Показано, что для двух переменных выбраны оптимальные модели для прогноза. В то время как для третьей переменной ни одна из моделей не позволяет использовать их для предсказания. Для данного случая предполагается использование нелинейных регрессионных моделей.

Показано, что напорные и энергетические характеристики объектов водоподачи при автоматическом управлении, обеспечивающем поддержание заданного давления на входе в распределительную сеть или на выходе из ПНС, представляют собой линейные зависимости относительно временных рядов давления на входе ПНС. В свою очередь, напорные характеристики водопроводных сетей при подобном автоматическом регулировании представляют собой линейные зависимости относительно временных рядов давления на входе в сеть водоснабжения.

Установленные закономерности для режимов работы насосных агрегатов и сетей водоснабжения при автоматическом регулировании позволяют упростить математические модели для описания режимов работы городской водораспределительной системы.

Выполненные исследования позволили сформулировать первое научное положение диссертационной работы в следующем виде: впервые в натуральных условиях установлены закономерности изменения технологических параметров и формирования эксплуатационных режимов городской водораспределительной системы, имеющей множественные элементы регулирования, которые обеспечивают поддержание заданного давления в диктующих точках сети. Установлено, что характеристика насосной станции, работающей на водопроводную сеть и обеспечивающей поддержание заданного давления, может быть представлена линейными регрессионными зависимостями между напором станции и давлением в диктующих точках сети при коэффициентах корреляции выше 0,9. Полученные зависимости дают возможность разработать информационные модели для управления объектами водоснабжения.

РАЗДЕЛ 3

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ
ПРОЦЕССАМИ СИСТЕМЫ ВОДОСНАБЖЕНИЯ ГОРОДА

3.1 Оперативное управление городскими системами водоподачи и водораспределения

Структура городской системы водоснабжения зависит от планировки города, рельефа местности, расположения водопроводных узлов (ВУ) и подкачивающих насосных станций, разветвленности водораспределительных сетей и особенностей объектов водоснабжения. Несмотря на разнообразие схем водоснабжения, можно выделить ряд типовых подсистем, из которых состоит структура большинства городских систем водоснабжения:

- вариант 1 – водопроводный узел, работающий на протяженный участок водораспределительной сети, которая, в свою очередь, обеспечивает подачу воды к различным ПНС и участкам водораспределительной сети;

- вариант 2 – подкачивающая насосная станция, работающая совместно с участком водораспределительной сети, которая обеспечивает водой многоквартирные дома различной этажности;

- вариант 3 – подкачивающая насосная станция, работающая совместно с участком водораспределительной сети, которая обеспечивает водой одноэтажный частный сектор;

- вариант 4 – подкачивающая насосная станция, работающая совместно со смешанным участком водораспределительной сети, которая обеспечивает водой, как многоквартирные дома, так и одноэтажный частный сектор;

- вариант 5 – протяженные участки водораспределительной сети между контрольными точками, где отсутствуют ПНС, но есть отдельные потребители.

Таким образом, выполненный анализ режимов работы водопроводных сетей и насосного оборудования позволяет провести декомпозицию территориально-распределенной системы водоснабжения с элементами регулирования на более

простые подсистемы. Такие подсистемы состоят из водопроводных узлов, подкачивающих насосных станций и отдельных участков водопроводных сетей, где расположены контрольные точки системы мониторинга. Декомпозиция городской системы водоснабжения на отдельные технологические объекты проводилась таким образом, чтобы с одной стороны, существовала полная информация о режимах работы объекта, которая собирается автоматизированными средствами технологического мониторинга. С другой стороны, обращалось внимание на то, чтобы на основе обработки информации, накопленной в технологической базе данных, имелась возможность формализации объектов в виде различных статистических моделей, разработанных в главе 2. Это позволило получить информационные модели объектов водораспределения и водоподачи, которые в дальнейшем использовались при разработке алгоритмов автоматического управления городской системой водоснабжения.

Системы автоматического управления технологическими режимами для указанных ранее подсистем строятся на основе сочетания различных алгоритмов управления типовыми элементами, входящими в состав данного технического объекта.

Наиболее важными являются задачи оперативного управления подсистемами по факту поддержания эффективных и оптимальных режимов, позволяющих обеспечить экономию электроэнергии и воды, а также задачи распознавания внештатных режимов и аварийных ситуаций. Трудность создания подобных алгоритмов управления связана с необходимостью построения в оперативном режиме моделей подсистем подачи и распределения воды и прогнозирования колебаний энерго- и водопотребления на текущий и предстоящий периоды. При этом факт построения соответствующих моделей подсистем является необходимым, но не достаточным, т.к. крайне важным является идентификация параметров моделей по текущим данным системы мониторинга и результатам длительной эксплуатации подсистем в целом.

В настоящее время при создании алгоритмов оперативного управления и поддержания эффективных и оптимальных режимов работы ВУ и ПНС в большинстве случаев не проводят гидравлические расчеты водопроводных сетей и не используют принятые при проектировании традиционные модели водораспределения — расчетные схемы водопроводных сетей. Это связано трудностью получения данных о фактических и требуемых значениях узловых расходов для каждого времени предстоящих суток, чрезмерно большими для оперативного управления затратами машинного времени на проведение расчетов даже при использовании мощных современных ЭВМ, а также большим количеством необходимых исходных данных, крайне высокой их неопределенностью и низкой достоверностью.

Обычно для поддержания эффективных режимов работы ВУ и ПНС используют только данные о напорах на насосных станциях и значения давлений в диктующих точках водопроводных сетей. При этом для расчета режимов работы насосных станций используют обобщенные математические модели, выражающие взаимосвязь напора Δh с расходом воды Q , который обеспечивается насосной станцией, и давлением P_d в диктующей точке сети:

$$\Delta h = P_d + a + b \cdot Q + c \cdot Q^2, \quad (3.1)$$

где a, b, c — коэффициенты, полученные в результате статистической обработки данных о параметрах работы насосных станций и участков водопроводной сети [82].

В ряде случаев характеристику сети описывают простой линейной моделью вида:

$$\Delta h = P_d + a + b \cdot Q, \quad (3.2)$$

Считается, что использование математических моделей (3.1) или (3.2) существенно облегчает расчет режимов насосных станций при достаточной для практических целей точности решения. В целях повышения точности обычно производят периодическое уточнение моделей, т.е. программа расчета включает блок идентификации параметров модели.

Существенным недостатком данного подхода является факт того, что гидравлические модели, принятые при расчетах водопроводных сетей без элементов регулирования, априори переносятся на водопроводные сети с элементами автоматического управления технологическими режимами. При отсутствии автоматического регулирования особенностью оперативного управления является необходимость учета колебаний водопотребления, которое носит случайный характер. В этом случае при обеспечении технологических режимов осуществляют прогнозирование процесса водоснабжения на основе данных о подаче воды насосными станциями за прошедший период.

При использовании современных АСУ технологическими режимами данный подход не является правомерным. В связи с тем, что для регулирования используются различные алгоритмы поддержания технологических режимов, колебания водопотребления могут иметь специфический характер. Например, в случае, когда АСУ за счет систем частотного регулирования насосами ПНС обеспечивает поддержание заданного давления на линии подачи воды в сеть, энергопотребление ПНС уже в меньшей степени будет определяться водопотреблением сети, а в большей степени будет зависеть от давления воды на линии входа в ПНС. При этом давление на линии подачи обычно задается на основе данных, полученных при длительной эксплуатации конкретного участка водораспределительной сети, особенностей данного участка и экспертной оценки отзывов местного населения о качестве процесса водоснабжения. Именно этот факт, как это видно из главы 2, не позволяет построить по экспериментальным данным зависимости вида (3.1) при использовании подобных алгоритмов управления.

Таким образом, технологический режим любого объекта водоподдачи и водораспределения при автоматическом регулировании будет существенно зависеть от принятых алгоритмов управления водоснабжением, что естественно.

Оперативное управление технологическими режимами работы ВУ и ПНС будем осуществлять путем декомпозиции этой задачи на ряд последовательно решаемых подзадач. При этом временной интервал управления разделим на

отрезки времени, в течение которых задаются различные технологические режимы подачи воды, например, в дневной и ночной периоды. Задание давления в диктующих точках конкретной водопроводной сети и его автоматическое поддержание будет определять водопотребление участка при относительно небольшом колебании расходов в сети в случае обеспечения штатных технологических режимов.

Целевой функцией выбора технологических режимов насосной станции будет являться минимизация ее энергетических затрат при обеспечении бесперебойной подачи воды потребителю и при соблюдении заданного напора в контрольных точках водопроводной сети в соответствии с реальным режимом водопотребления.

Если параметры ПНС или водопроводной сети в диктующих или контрольных точках выходят за заданные интервалы, то в этом случае возможно возникновение внештатных ситуаций, которые должны оперативно распознаваться экспертной системой с одновременной выдачей сообщения диспетчеру.

Чаще всего алгоритмы оперативного управления подобных сложных систем отрабатываются опытным путем в натурных условиях. Оперативное управление для приведенных выше типовых подсистем городских систем водоснабжения производится в такой последовательности.

Вариант 1. Водопроводный узел, обеспечивающий водой определенную территорию города, является наиболее сложным типовым объектом городской системы водоснабжения. Оперативное управление ВУ с целью поддержания эффективных режимов, позволяющих дать экономию электроэнергии и воды, осуществляется по трем направлениям:

- обеспечение необходимых объемов воды в резервуарах ВУ;
- поддержание эффективных режимов работы насосных станций, позволяющих обеспечить экономию электроэнергии;
- обеспечение требуемых расходов на линиях подачи воды потребителям.

В первом случае путем непрерывного синусоидального изменения расхода воды на приходе в течении суток обеспечивается повышенное накопление воды в резервуарах. Ночью с 0⁰⁰ до 6⁰⁰ поступление воды в резервуары увеличивается по сравнению с дневным периодом, чем обеспечивается к утру требуемый объем воды в резервуарах ВУ. Увеличение расходов позволяет за ночь сделать необходимый запас воды на период дневного водоснабжения, когда расходы воды на потребление увеличиваются. Для этого система автоматического регулирования настраивается на поддержание заданных максимальных и минимальных уровней воды в резервуарах. Регулирование осуществляется изменением проходного сечения автоматизированной задвижки на приходе. Параметры функции управления расходами воды определяются эмпирически путем длительной эксплуатации оборудования ВУ.

Поддержание эффективных режимов работы насосных станций ВУ осуществляется путем ступенчатого изменения давления воды – ночью давление на выходе ВУ поддерживается существенно меньше, чем днем. Кроме того, система автоматического регулирования насосных агрегатов настроена на поддержание на гребенке ВУ постоянного давления воды при ее подаче в общую сеть. Регулирование осуществляется изменением скорости вращения рабочих колес насосов путем микропроцессорного управления частотными преобразователями, позволяющими изменять скорость вращения электродвигателей.

Обеспечение требуемых расходов на линиях подачи воды потребителям также осуществляется автоматически за счет перераспределения гидравлического сопротивления на различных линиях подачи воды. Регулирование осуществляется изменением проходного сечения автоматизированных задвижек на линии подачи воды потребителям. Это позволяет автоматически поддерживать заданный расход на каждой линии подачи воды потребителям.

Вариант 2. Типовая подсистема, которая включает подкачивающую насосную станцию и участок водораспределительной сети многоэтажных домов является наиболее распространенным объектом водоснабжения, требующим

регулирования. Оперативное управление подсистемой с целью поддержания режимов, позволяющих обеспечить экономию электроэнергии и воды, осуществляется с помощью регулирования подачи воды потребителям. В этом случае обеспечивается ступенчатое изменение давления воды – ночью на выходе ПНС, подающих воду на многоэтажные дома, поддерживается давление воды на 0,7 – 0,8 атм ниже, чем днем. Снижение давления воды в течении суток позволяет уменьшить мощности насосов при обеспечении различных расходов воды днем и ночью. Кроме этого системы автоматики большинства насосных агрегатов настроены на поддержание на выходе ПНС постоянного давления воды при ее подаче в сеть. Регулирование осуществляется изменением скорости вращения рабочего колеса насоса путем микропроцессорного управления частотными преобразователями, позволяющими изменять скорость вращения электродвигателей. Параметры функций управления устанавливаются для каждой ПНС эмпирически.

Вариант 3. Оперативное управление данной типовой подсистемой осуществляется путем поддержания на выходе ПНС постоянного давления воды при ее подаче в сеть. Данное давление для каждого участка, охватывающего территории частного сектора с одноэтажными домами, устанавливается эмпирическим путем по качеству водоснабжения населения при длительной эксплуатации объекта водоснабжения.

Вариант 4. Оперативное управление подсистемой, состоящей из подкачивающей насосной станции и водораспределительной сети, которая обеспечивает водой, как многоквартирные дома, так и одноэтажный частный сектор, осуществляется таким же образом, как и типовой подсистемы представленной как вариант 2. Однако на линиях подачи воды в частный сектор устанавливаются автоматические задвижки, настроенные на поддержание заданного (более низкого) давления. Это позволяет исключить порывы трубопроводов, которые могут быть связаны с высоким давлением, создаваемым насосами ПНС, а также гидростатическими напорами, возникающими при перепаде высот.

Вариант 5. Протяженные участки водораспределительной сети между контрольными точками, где отсутствуют ПНС, но есть потребители, регулируются по давлению в диктующих или контрольных точках. Обычно в таких точках устанавливаются автоматические задвижки, поддерживающие заданное давление, и информация с данной контрольной точки передается диспетчеру для принятия управляющего решения [82].

Наиболее важным элементом управления водоснабжением является установление эффективных эксплуатационных режимов по каждому объекту водоподдачи и водоснабжения.

Установление эксплуатационных режимов работы насосных станций и оперативное управление режимами работы станций осуществляется городской диспетчерской службой водно-канализационного хозяйства (ВКХ), под руководством главного инженера ВКХ. Режимы работы насосных станций должны быть взаимоувязаны с режимами работы системы водоснабжения и водоотведения в целом, с учетом режимов работы остальных сооружений: водопроводных и канализационных сетей, резервуаров, очистных сооружений и проч.

Приведение в соответствие режима работы насосных станций с режимом работы водопроводных или канализационных сетей осуществляется различными способами:

а) правильным подбором состава насосных агрегатов для изменяющихся режимов водоподдачи. Для этого расчетным и опытным путем подбираются наиболее экономичные рабочие комбинации разнотипных насосов для различных диапазонов водоподдачи. При необходимости, у некоторых насосов подрезаются рабочие колеса;

б) регулированием режима работы отдельных насосных агрегатов, путем: дросселирования насосов напорными задвижками, изменения угла поворота лопастей рабочих колес осевых насосов или направляющих аппаратов (при их наличии), сброса воды из напорных линий насосов в приемные резервуары или во

всасывающие линии насосов. Регулирование центробежных насосов всасывающими задвижками запрещается;

в) регулированием частоты вращения рабочих колес насосов с помощью регулируемого привода, а также сочетанием этого способа с вышеназванными способами.

Для эффективного регулирования режимов работы на каждой станции разрабатывается организационное и технологическое обеспечение – режимные карты и типовые графики, регламентирующие условия различных способов регулирования в зависимости от реальных режимов водопотребления или притока сточных вод.

Методика отработки алгоритмов автоматического управления объектами предполагала на основе изучения и обобщения опыта эксплуатации объекта и анализа данных технологического мониторинга подготовку предложений по определению режимов работы объекта и выбору способов и параметров автоматического регулирования. Разработанные при участии автора данной работы предложения по всем объектам управления системы водоснабжения Киевского района рассматривались на технических совещаниях и утверждались главным инженером. После этого по результатам анализа разрабатывались режимные карты, графики водоснабжения и технологические инструкции, которые передавались на объекты на которых предполагалась реализация систем автоматического регулирования. Далее проводилась модернизация объектов водоснабжения, объекты оборудовались средствами автоматического регулирования и управления, вносились изменения в программы систем автоматизированного управления (САУ) и проводились длительные режимно-наладочные испытания по отработке параметров алгоритмов автоматического регулирования. В процессе режимно-наладочных испытаний по каждому объекту выполнялось:

- ознакомление с работой и с проектными данными объекта водоподачи;
- составление программы и методики испытаний средств автоматического регулирования;

- проведение подготовительных и пробных работ для проверки работы оборудования, контрольно-измерительных приборов и средств управления;
- проведение основных программных работ, обработка результатов измерений и составление сводных таблиц и графиков;
- составление технического отчета, режимных карт и мероприятий, направленных на отработку оптимальных алгоритмов управления объектами.

Разработка алгоритмов автоматического управления предусматривала также распознавание внештатных технологических ситуаций и аварийных режимов, которые могут возникнуть при эксплуатации системы водоснабжения. С этой целью проводился опрос диспетчеров, механиков и работников инженерных служб различных предприятий водоснабжения по выявлению внештатных ситуаций, и устанавливались закономерности в работе системы, которые позволяют распознать внештатные режимы и аварийные ситуации.

Распознавание внештатных режимов и аварийных ситуаций для каждой из выделенных типовых подсистем городской системы водоснабжения проводится применительно к определенному событию в отдельности. Перечень внештатных режимов и аварийных ситуаций для различных объектов водоподдачи и водораспределения приведен в таблице 3.1 [82].

Каждая ситуация, должна предусматривать определенный алгоритм распознавания, который дает возможность выявить характерные неблагоприятные события, обеспечить представление оперативной информации диспетчеру и реализовать функции управления или функции защиты, позволяющие предотвратить развитие этой ситуации.

Формулировка задач оперативного управления по поддержанию эффективных режимов, позволяющих обеспечить экономию электроэнергии и воды, а также задач распознавания внештатных режимов и аварийных ситуаций позволила разработать алгоритмы управления технологическими режимами систем водоснабжения с множественными элементами автоматического регулирования.

3.2 Реализация технологической системы управления режимами водоснабжения Киевского района г. Донецка

Подсистема регулирования и управления технологическими режимами водоснабжения Киевского района является двухуровневой. Верхний уровень подсистемы создан в виде модуля управления центрального диспетчерского пункта (ЦДП) и отображения мнемосхем в режиме управления. Благодаря этому модулю диспетчер ведет анализ эффективности работы объектов в текущий момент времени и при необходимости может принимать решения об изменении режимов работы оборудования. Команды управления реализуются с помощью подсистемы формирования и передачи управляющих сигналов.

Нижний уровень подсистемы существует на каждом локальном объекте, который требует внедрения средств автоматического регулирования. Для управления оборудованием в этом случае создано ПО нижнего уровня.

Подсистема регулирования и управления технологическими режимами позволяет:

- осуществлять дистанционное управление процессами из центрального диспетчерского пункта, а также автоматическое управление исполнительными механизмами на локальном уровне на основе оперативного анализа собранной технологической информации;
- выявлять, регистрировать и сигнализировать о состоянии объекта в процессе возникновения нерасчетных эксплуатационных режимов;
- распознавать и регистрировать аварийные ситуации.

Таблица 3.1 – Перечень внештатных и аварийных ситуаций возникающих при эксплуатации городских систем водоснабжения

№	Внештатная или аварийная ситуация	Характеристика ситуации и условия для ее распознавания
1	2	3
Водопроводные узлы		
1	Резкий рост расхода воды на гребенке линий подачи	Возможны аварии, порывы на трубопроводах, резкие отборы воды и т.д. Распознается по резкому увеличению расхода на гребенке и подающих трубопроводах ВУ
2	Отсутствие расхода воды на приходе ВУ	Возможен порыв подающего магистрального трубопровода, прекращение подачи воды от компании-поставщика Распознается по резкому снижению расхода на приходе ВУ
Подкачивающие насосные станции		
3	Прекращение подачи электроэнергии на ПНС	Возможен обрыв фазы, обесточивание района электроснабжения и т.д. Распознается по исчезновению напряжения на вводе в ПНС
4	Отсутствие расхода воды на линии входа в ПНС	Возможен порыв подающего трубопровода, неправильное регулирование подачи воды на ВУ Распознается по падению давления на линии входа в ПНС
Участки водопроводной сети		

Продолжение таблицы 3.1

1	2	3
5	Неисправность задвижек	<p>Возможен разрыв корпуса, аварийное закрытие (опускание дисков) и т.д.</p> <p>Распознается по резкому повышению или падению давления в контрольной точке</p>
6	Резкое увеличение или уменьшение расхода	<p>Возможен несанкционированный отбор воды, рост потребления в жаркую погоду, порывы трубопроводов и т.д.</p> <p>Распознается по резкому изменению расхода воды по сравнению с предыдущим периодом на контрольной точке</p>

На водопроводных узлах ПНС, КНС и водораспределительных сетях в точках регулирования технологических процессов реализуются различные алгоритмы автоматизированного управления.

На водопроводных узлах (Рисунок 3.1) регулирование мощными насосами (500 – 800 кВт) осуществляется с помощью микропроцессорного управления частотными преобразователями, позволяющими изменять скорость вращения электродвигателей. Управление насосами осуществляется таким образом, чтобы на гребенке перед задвижками, подающими воду по разным технологическим линиям (Рисунок 3.1, линии – НИИКа, Точмаш, Засядько) поддерживалось заданное давление. Управление задвижками осуществляется путем изменения проходного сечения задвижки с помощью электропривода. На рисунке 3.1 показана мнемосхема Северного водопроводного узла в режиме визуализации технологических параметров, а на рисунке 3.2 приведена эта же мнемосхема в режиме управления технологическими параметрами.

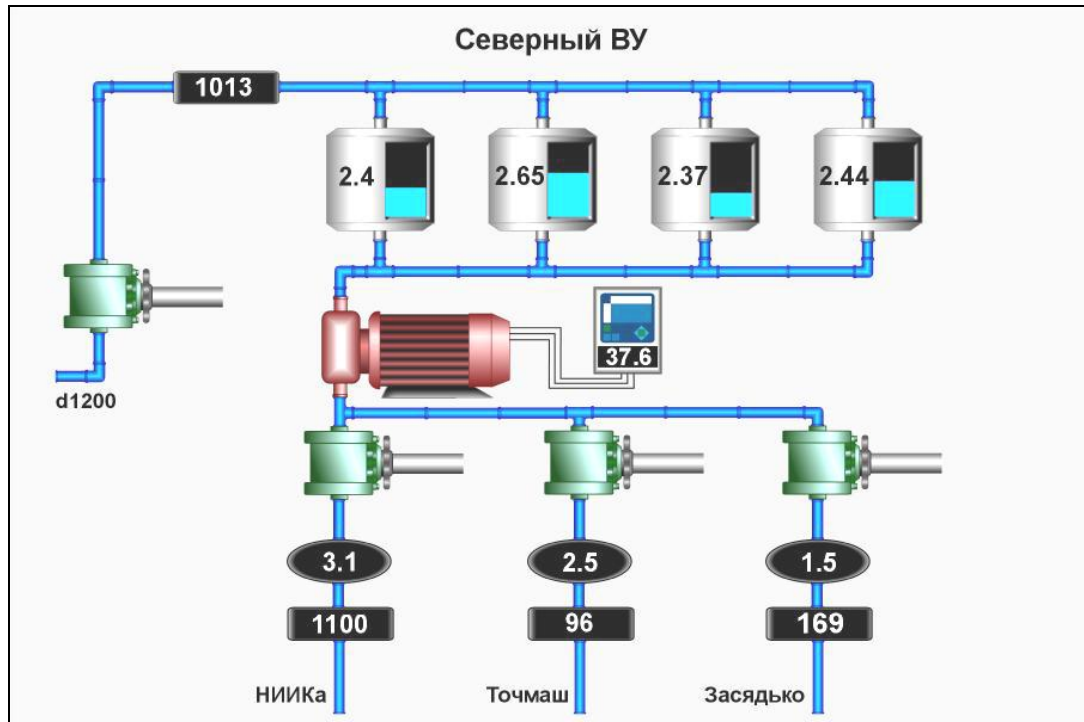


Рисунок 3.1 – Фрагмент мнемосхемы Северного водопроводного узла АСУ ТП КП «Донецгорводоканал»

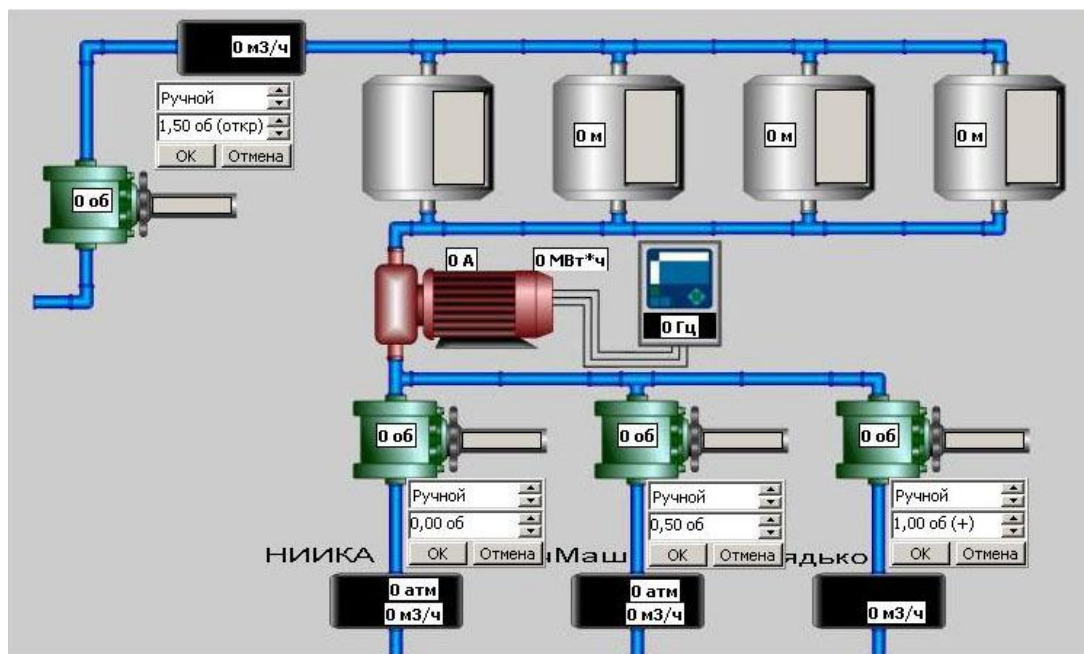


Рисунок 3.2. – Фрагмент мнемосхемы Северного водопроводного узла в режиме управления технологическими параметрами водоснабжения.

На подкачивающих насосных станциях регулирование насосами осуществляется в основном автоматически с помощью микропроцессорного управления частотными преобразователями непосредственно на объекте. На рисунках 3.3 и 3.4 приведены мнемосхемы ПНС, а на рисунке 3.5 показана мнемосхема контрольной точки.

Для создания мнемосхем и управления оборудованием применяется модуль управления и отображения мнемосхем центрального диспетчерского пункта. Данный модуль предназначен для отображения на экране мнемосхемы выбранного объекта мониторинга и управления, а также передачи команд управления на элемент АСУ объекта. Для отображения мнемосхемы объекта модуль использует подложку – схематическое изображение установленного на точке оборудования. Используется цветовое кодирование для отображения времени последнего выхода точки на связь, индикации поломки оборудования или выхода его параметров за пределы нормы.

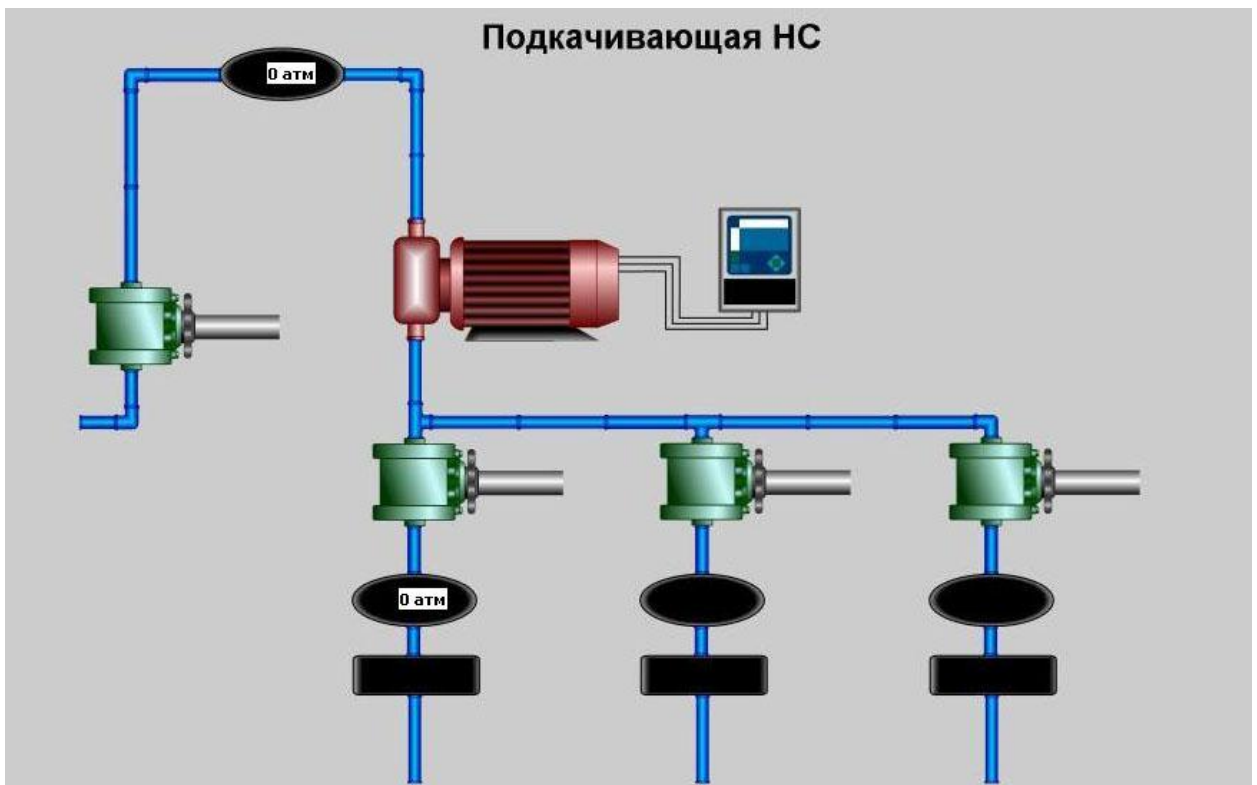


Рисунок 3.3 – Фрагмент мнемосхемы ПНС с тремя линиями подачи воды

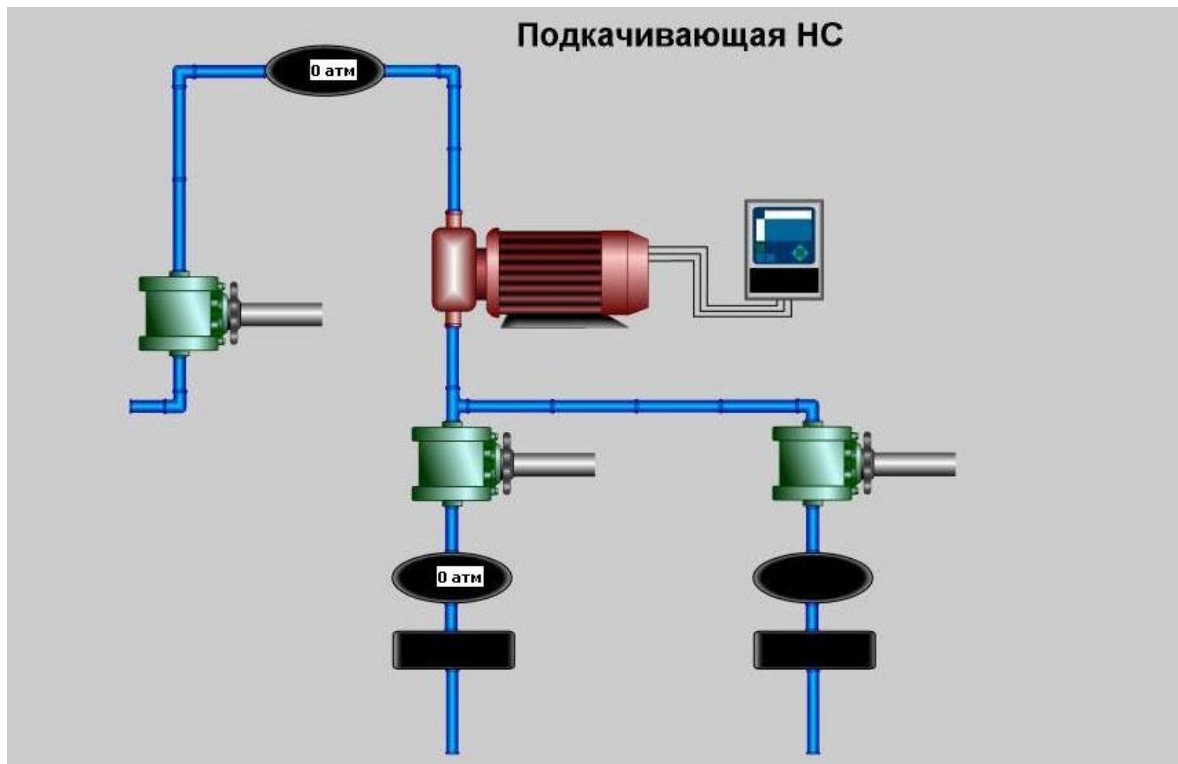


Рисунок 3.4 – Фрагмент мнемосхемы ПНС с двумя линиями подачи воды

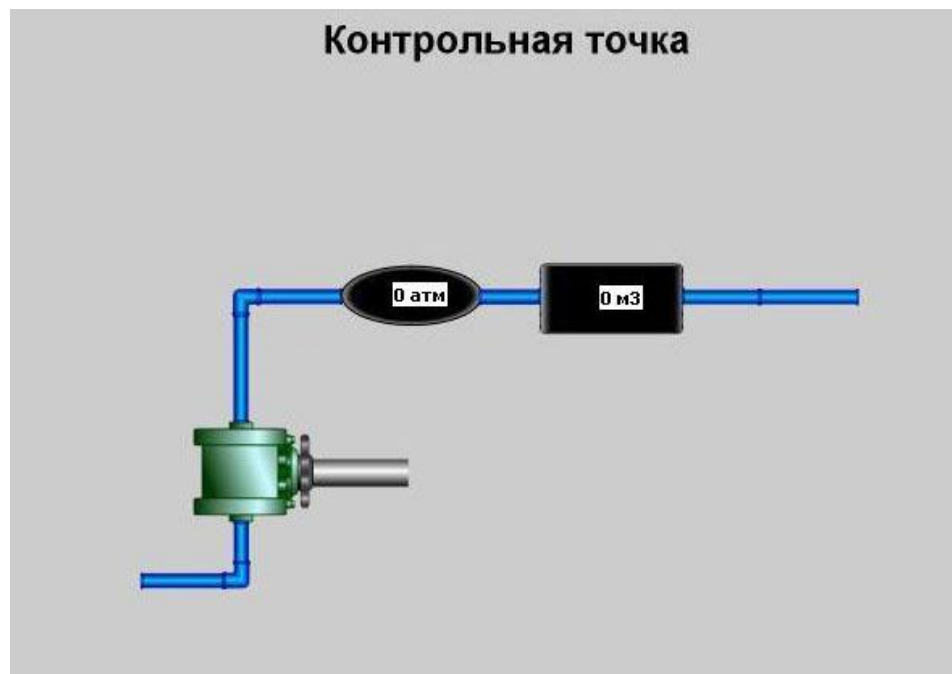


Рисунок 3.5 – Фрагмент мнемосхемы «Контрольная точка» на подающем трубопроводе

Для управления ПНС или точками управления на локальном уровне в автоматическом режиме разработано ПО нижнего уровня. Программное обеспечение промышленного контроллера водопроводного узла, ПНС или точки управления функционирует в операционной среде MS-DOS 6.22 и представляет собой главный исполняемый файл, файл конфигурации и драйвер сетевой интерфейсной карты Ethernet. Основными задачами ПО нижнего уровня ВУ являются:

- организация взаимодействия сетью с периферийных контроллеров, отвечающих за сбор данных с датчиков различного типа и управление различными исполнительными механизмами;
- периодическая отправка данных по сети Ethernet локальному диспетчеру для визуализации технологического процесса;
- взаимодействие с локальным диспетчером согласно протоколам обмена данными;
- периодическая отправка данных центральному диспетчеру через радиощлюз;
- взаимодействие с радиощлюзом согласно протоколам обмена данными;
- формирование управляющих воздействий на контуры регулирования;
- мониторинг состояния работающего технологического оборудования;
- выполнение функций периодического самотестирования.

В программном обеспечении промышленного контроллера подкачивающей насосной станции реализованы функции взаимодействия с радиомодемом, периодического опроса каналов АЦП и интегрирования накопительных каналов, формирования посылок данных, взаимодействия с радиоканалом согласно протоколу работы с центральной диспетчерской, а также периодического самотестирования.

В результате проведенных работ была создана современная подсистема регулирования и управления технологическими режимами водоснабжения Киевского района. Данная подсистема содержит 45 каналов управления, в том числе:

- 10 каналов по регулируемым задвижкам;
- 25 каналов по частотным регуляторам электродвигателей;
- 10 других каналов управления.

Созданная технологическая система управления режимами водоснабжения Киевского района г. Донецка позволила в течении нескольких лет опытным путем в натуральных условиях отработать алгоритмы автоматического управления оборудованием. Целью реализации алгоритмов являлось повышение эффективности работы технологических объектов системы водоснабжения за счет минимизации энергетических затрат насосного оборудования и качественного управления расходами и давлением воды. Дополнительно отрабатывались также алгоритмы распознавания нештатных технологических ситуаций и аварийных режимов, которые могут возникнуть при эксплуатации системы водоснабжения.

3.3 Разработка алгоритмов управления системами водоснабжения с множественными элементами регулирования

Для решения задач оперативного управления подсистемами по факту поддержания эффективных режимов, а также задач распознавания нештатных режимов и аварийных ситуаций, необходимо иметь формализованное представление объектов автоматизации в виде гидравлических моделей с сосредоточенными параметрами или в виде статистических моделей. Для разработки гидравлических моделей имеется достаточно обширная литература [43,60,61,62,71,73]. Теоретической основой построения моделей являются уравнения гидромеханики и гидродинамики [63,71]. Однако классические подходы в прикладной гидромеханике чаще всего не учитывают особенности, которые могут определять процессы водоснабжения при автоматическом управлении. В связи с тем, что обычно алгоритмы управления направлены на поддержание постоянных параметров в диктующих точках сети (давления, расхода или уровня), динамические составляющие гидравлических уравнений вырождаются и на первый план выходят стохастические составляющие, которые

определяются случайным характером процесса водопотребления и функциями отклика систем управления на внешнее воздействие.

В этих условиях при отработке алгоритмов построение моделей объекта управления является первоочередной задачей, которую следует решать при разработке систем управления, регулировании режимов сложного объекта водоснабжения и его проектирования с заданными динамическими свойствами, которые в основном определяются алгоритмами управления [11,81,94,107,108]. Это является определяющим условием, при котором обычные математические модели объектов управления заменяют информационными моделями, позволяющими опытным путем подобрать функции временной модуляции давления или расхода и определить их параметры.

Под информационной моделью территориально-распределенной системы водоснабжения с множественными элементами регулирования будем понимать взаимосвязанный комплекс объектов управления водоподачей и водораспределением, который включает в себя:

- статистические модели объектов водоподачи и водораспределения, адекватно отражающие закономерности водоснабжения;
- информационные базы данных ретроспективной и текущей технологической информации, собранной системой мониторинга;
- алгоритмы управления работой оборудования и средствами регулирования, которые реализуют эффективные технологические режимы, обеспечивающие экономию электроэнергии и воды и рекомендованные к применению по результатам длительной эксплуатации системы водоснабжения;
- алгоритмы распознавания внештатных технологических режимов и алгоритмы защиты от возникновения аварийных ситуаций.

Наиболее важной задачей при изучении информационных моделей систем водоподачи и водораспределения является установление эффективных функций модуляции для управления объектами водоснабжения. Временная функция модуляции позволяет с определенной периодичностью изменять в течении суток давление или расход воды в диктующих точках сети. Это осуществляется путем

реализации алгоритмов регулирования и управления объектом через микропроцессорную систему управления. Считается, что управление давлением за счет временной модуляции дает больший эффект при экономии энергии.

Временные функции модуляции определялись опытным путем с помощью изменения режимов водоснабжения объектов Киевского района г. Донецка. Данные функции позволили разработать алгоритмы управления объектами, которые включены в режимные карты, графики водоснабжения и технологические инструкции эксплуатации объектов городских систем водоснабжения.

3.3.1 Алгоритмы управления подкачивающими насосными станциями

Для разработки алгоритмов управления и построения информационных моделей ПНС воспользуемся закономерностями, установленными в разделе 2.4. Определение вида напорных характеристик ПНС при регулировании технологических режимов является первостепенной задачей в процессе создания информационных моделей. Следует отметить, что при автоматическом управлении объектами водоснабжения классические гидравлические характеристики вида «напор – расход» не всегда можно определить. На рисунке 3.6 показано для примера характерное распределение экспериментальных данных по значениям создаваемого напора и расхода при работе ПНС в течении 8 часов (снятие данных через 30 мин). Из рисунка видно отсутствие зависимости между создаваемым напором и расходом ПНС. Тем не менее, как видно из рисунка 3.7, по тем же данным существует очень тесная зависимость между создаваемым напором и давлением воды на линии входа в ПНС. При этом следует отметить, что при случайном изменении гидравлических характеристик сети, которое происходит в течении суток, давление воды на выходе из ПНС не является постоянным, а несколько изменяется. Это происходит, несмотря на то, что система автоматического регулирования настроена на обеспечение постоянного

давления на выходе из ПНС за счет изменения скорости вращения рабочего колеса насоса.

Таким образом, как видно из рисунка 3.7, расчетные модели, определяющие напорные характеристик для ПНС при автоматическом управлении, которое обеспечивает поддержание заданного давления в диктующих точках водопроводной сети, могут быть представлены простыми линейными регрессионными моделями с достаточно высокими коэффициентами корреляции (0,9 и выше) вида:

$$\Delta h(t) = a \cdot P_1(t) + b. \quad (3.3)$$

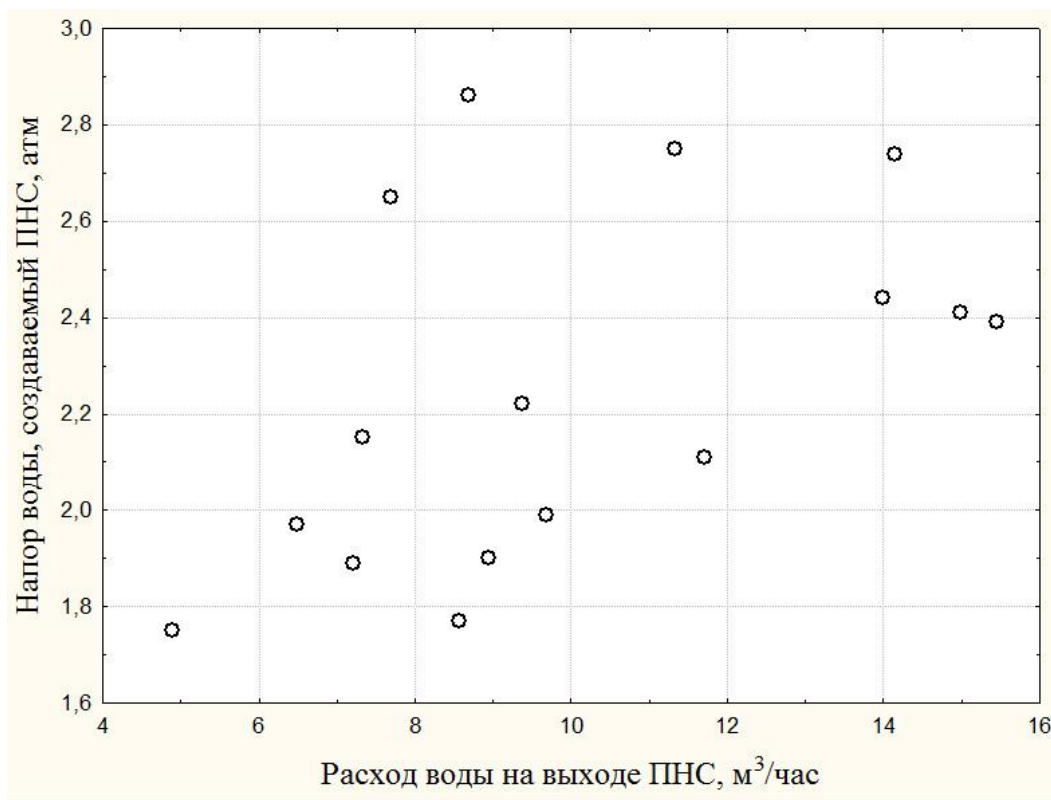


Рисунок 3.6 – Зависимость напора от расхода воды для ПНС квартал 219 – квартал 220

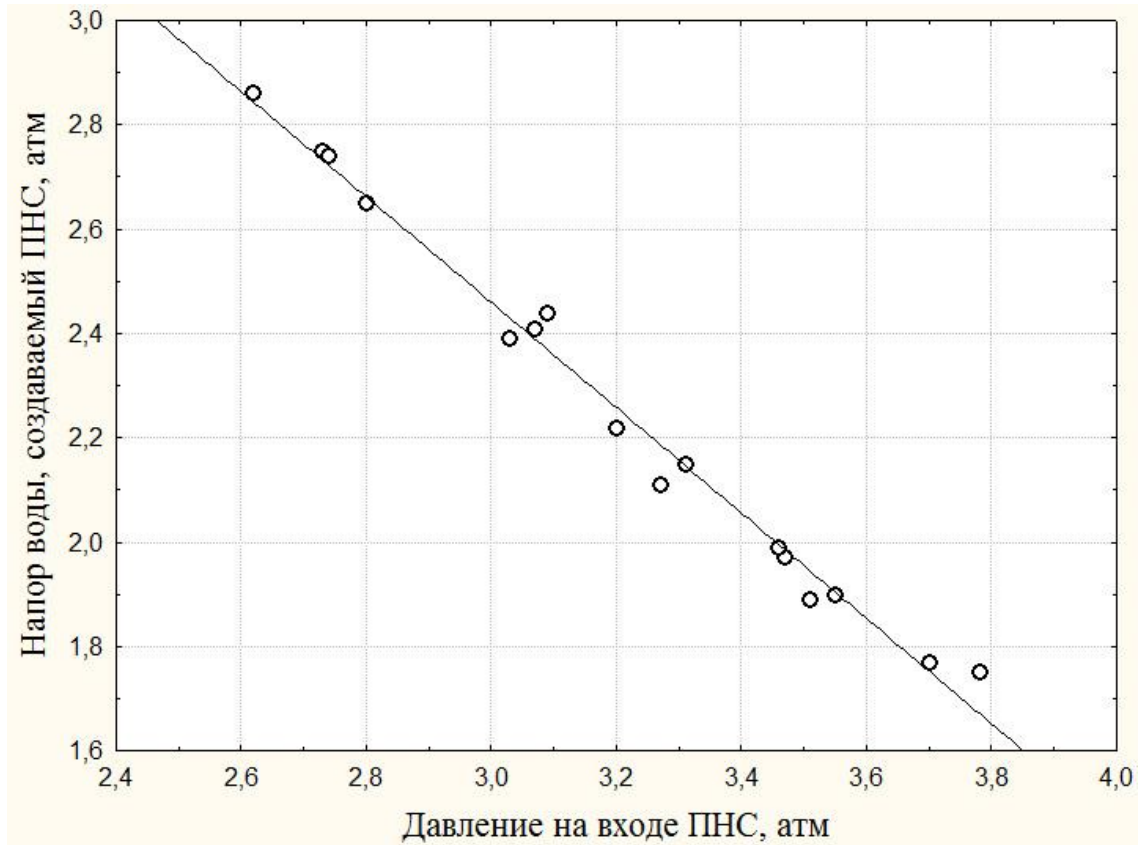


Рисунок 3.7 – Зависимость напора от давления воды на линии входа для ПНС квартал 219 – квартал 220

Анализ показывает, что коэффициенты a и b должны определяться по данным предыдущего периода, причем, чем меньше продолжительность периода, тем точнее зависимость (3.3). Это говорит о том, что коэффициенты a и b как функции времени характеризуют конкретные технологические режимы водораспределения, которые определяются принятыми функциями модуляции давления в течении суток. Допустимые интервалы для зависимости (3.3) определяются согласно [71,73]. Для величины $\Delta h(t)$, находимой из прямой регрессии $\Delta h(t) = a \cdot P_1(t) + b$, допустимые интервалы имеют вид:

$$\Delta h(t) = a \cdot P_1(t) + b \pm T_j \frac{\delta_y^2}{\sqrt{n-2}} \sqrt{1 - \frac{(P_1(t) - P_1^{cp}(t))^2}{S_P^2}}; \quad (3.4)$$

$$\delta_y^2 = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^n (\Delta h(t) - a \cdot P_1(t) - b)^2,$$

где T_j – симметричные « j » доверительные границы для распределения Стьюдента с $(n - 2)$ степенями свободы; n – число принятых к обработке данных; $P_1^{cp}(t)$ – среднее значение давления воды на входе в ПНС; S_P^2 – эмпирическая дисперсия давления воды на входе в ПНС.

Проведенные в главе 2 исследования по определению напорных характеристик для ПНС при автоматическом управлении указывают на то, что математические модели этих объектов водоподачи могут быть представлены статистическими зависимостями вида (3.3).

В свою очередь информационные базы данных, создаваемые при мониторинге, предполагают сбор данных как минимум по двум технологическим показателям работы ПНС – давлениям воды на линиях входа и выхода ПНС.

В процессе длительной эксплуатации системы водоснабжения опытным путем в натуральных условиях был отработан алгоритм управления работой оборудования ПНС, который обеспечивает экономию электроэнергии и воды. При этом в процессе исследований были определены параметры функции временной модуляции давления для ПНС.

Данный алгоритм регулирования подачи воды потребителям в г.Донецке предполагает ступенчатое изменение давления воды во времени: ночью с 0⁰⁰ до 6⁰⁰ на выходе ПНС, обеспечивающих водой 9-ти этажные дома, поддерживается давление воды равное 3,5 атм; утром, днем и вечером с 6⁰⁰ до 24⁰⁰ – поддерживается давление равное 4,2 атм. В свою очередь на ПНС, обеспечивающих водой 12-ти этажные дома, ночью поддерживается давление воды равное 4,2 атм, а утром, днем и вечером – давление равное 5,0 атм. Уменьшение давления воды на 0,7 – 0,8 атм в течении суток позволяет снизить мощности насосов при обеспечении различных расходов воды днем и ночью без ухудшения качества водоснабжения. Система автоматического регулирования насосного агрегата каждой ПНС настроена на поддержание на выходе ПНС

постоянного давления воды при ее подаче в сеть – для 9-ти этажных домов 3,5(4,0) атм, для 12-ти этажных домов 4,2(5,0) атм. Регулирование осуществляется путем микропроцессорного управления частотными преобразователями, позволяющими изменять скорость вращения электродвигателя насоса для обеспечения заданного давления. В процессе работы алгоритма блок идентификации параметров модели (3.3) периодически определяет коэффициенты a и b по данным, которые поступают от системы мониторинга режима работы ПНС. Осреднение осуществляется по предыдущим данным, получаемым за период времени с 24⁰⁰ до 6⁰⁰ и за период с 6⁰⁰ до 24⁰⁰. В случае, если фактические значения напора $\Delta h_{\phi}(t)$ не попадают в допустимые интервалы регрессионной зависимости (3.3), определяемые согласно (3.4), то считается, что технологический режим изменился и в результате анализа для предотвращения внештатных режимов АСУ ТП выдает сообщение диспетчеру для оценки ситуации и принятия решения.

Кроме этого в процессе исследований отработан алгоритм, обеспечивающий защиту оборудования ПНС от аварийных режимов. Если давление на линии входа воды в ПНС падает ниже 1,0 атм, то для исключения возникновения кавитации в рабочей области насоса, ПНС обесточивается. Это дает возможность исключить аварийные ситуации, связанные порывом трубопроводов на участках до ПНС или неправильным регулированием подачи воды на ВУ.

При возникновении аварийной ситуации, связанной с прекращением подачи электроэнергии на ПНС, силовое оборудование отключается и одновременно АСУ ТП выдает сообщение диспетчеру, используя независимый источник питания.

Предложенные алгоритмы работы ПНС, позволяют локализовать значительную часть управляющих сигналов на локальных объектах управления, обеспечив при этом централизованное регулирование только давлений в диктующих точках сети и текущий мониторинг режимов работы оборудования ПНС [82].

3.3.2 Алгоритмы управления и мониторинга технологическими режимами для участков водораспределительных сетей

Технологические режимы отдельных участков водораспределительных сетей контролируются по трем технологическим показателям работы – давлению воды на линии входа в участок водораспределительной сети (чаще всего это контрольная точка или выход ПНС), расходу и давлению воды на выходе из участка (в контрольной точке). Это позволяет реализовать следующий алгоритм управления и мониторинга технологических режимов участков водораспределительных сетей, который дает возможность распознать внештатные режимы и аварийные ситуации.

Система мониторинга ведет непрерывный сбор данных о параметрах режима работы участка сети между контрольными точками или между ПНС и контрольной точкой. В процессе работы алгоритма блок идентификации параметров зависимости (2.6) периодически определяет коэффициент $\alpha(S_0, l) = \alpha_\phi(t)$ по контролируемым параметрам, которые поступают от средств измерений давления и расхода воды. Осреднение осуществляется по предыдущим данным, получаемым за период времени с 24⁰⁰ до 6⁰⁰ и за период с 6⁰⁰ до 24⁰⁰.

Допустимый интервал, заданный с надежностью γ (доверительной вероятностью), для математического ожидания величины α_ϕ определяются согласно зависимости [29]:

$$\bar{\alpha} - t_k \frac{\delta}{\sqrt{n}} < \alpha_\phi(t) < \bar{\alpha} + t_k \frac{\delta}{\sqrt{n}}, \quad (3.5)$$

где $\bar{\alpha}$ – среднее значение величины $\alpha_\phi(t)$ по данным, полученным за предыдущий контрольный период; n – число принятых к обработке данных за предыдущий контрольный период; δ – среднеквадратическое отклонение; t_k – критерий Стьюдента при надежности γ .

Если значение величины $\alpha_\phi(t)$ не попадает в допустимый интервал (3.5), то считается, что технологический режим работы водораспределительной сети

изменился и АСУ ТП выдает сообщение диспетчеру для оценки ситуации и принятия решения. Диспетчер может принять решение об изменении режима работы ближайшей ПНС или выдать команду на обследование участка водораспределительной сети.

Кроме этого разработан алгоритм, обеспечивающий защиту трубопроводов от аварийных режимов. Для каждой контрольной точки установлены допустимые интервалы изменения давления и расхода воды, которые определяются на основе оценок для математических ожиданий наблюдаемых величин. Если давление или расход воды в контрольной точке резко повысились или снизились и при этом их значения вышли за доверительный интервал, то алгоритм анализа технологического режима выдает сообщение диспетчеру. Это дает возможность исключить аварийные ситуации, связанные порывом трубопроводов на участке или неисправностью задвижек.

3.3.3 Алгоритмы управления водопроводными узлами

Водопроводные узлы предприятий водоснабжения являются наиболее сложными технологическими объектами. Для отработки алгоритмов управления насосными станциями ВУ были использованы данные мониторинга технологических параметров водопроводного узла Северный г. Донецка при реализации различных функций модуляции давления и расхода в диктующих точках ВУ. При автоматическом управлении насосными станциями АСУ ТП поддерживает постоянным давление на гребенке линий подачи, а автоматические задвижки обеспечивают подачу постоянного расхода по каждой линии, идущей к потребителям от гребенки. Тем не менее, как видно из рисунка 3.8, расход воды колеблется со временем, т.к. принятый алгоритм изменяет давление подачи в течении суток.

Как показывает анализ данных, расчетные модели, определяющие напорные характеристик для насосных станций ВУ при автоматическом управлении, которое обеспечивает поддержание заданного давления в диктующих точках

водопроводной сети, могут быть представлены простыми линейными регрессионными моделями с достаточно высокими коэффициентами корреляции (0,8 и выше) вида:

$$\Delta h(t) = a \cdot Q_0(t) + b. \quad (3.6)$$

Коэффициенты a и b определялись по данным предыдущего периода, причем, чем меньше продолжительность периода, тем точнее зависимость (3.6). Это говорит о том, что коэффициенты a и b как функции времени определяют конкретные технологические режимы водораспределения, которые реализуются алгоритмами управления.

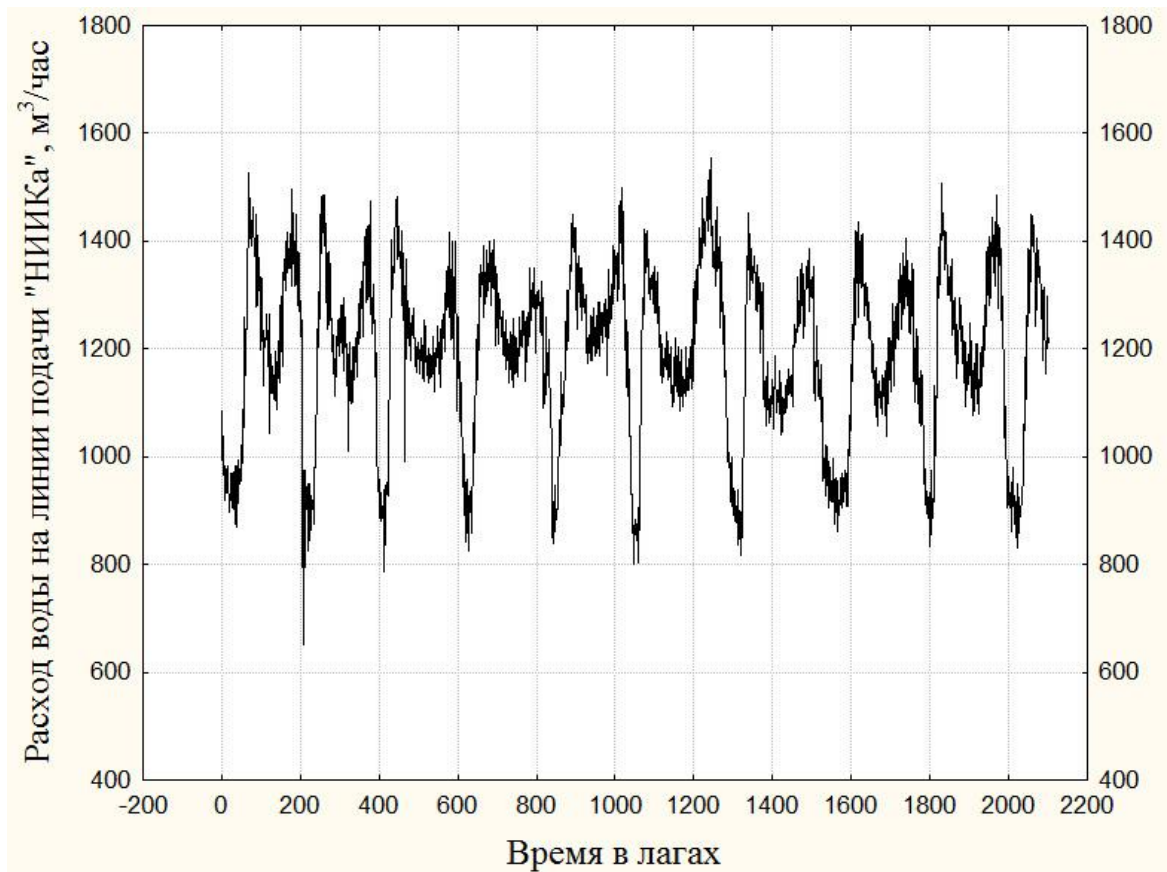


Рисунок 3.8 – Изменение расхода воды во времени на линии подачи «НИИКа» ВУ Северный. Один лаг временного ряда – 5 минут

На рисунке 3.9 показана типовая зависимость напора насосной станции от прокачиваемого через нее расхода воды. Чем меньше интервал контроля, тем

точнее получается зависимость вида (3.6). Допустимые интервалы зависимости (3.6) определяются согласно зависимости (3.4).

В свою очередь информационные базы данных, создаваемые при мониторинге, предполагают сбор данных следующих технологических показателей: давления и расходы воды на линиях подачи, давления воды на гребенке, расход воды, прокачиваемый через насосную станцию ВУ, и т.д.

В процессе длительной эксплуатации системы водоснабжения был отработан алгоритм управления работой оборудования ВУ, который реализует эффективный технологический режим, обеспечивающий экономию электроэнергии и воды.

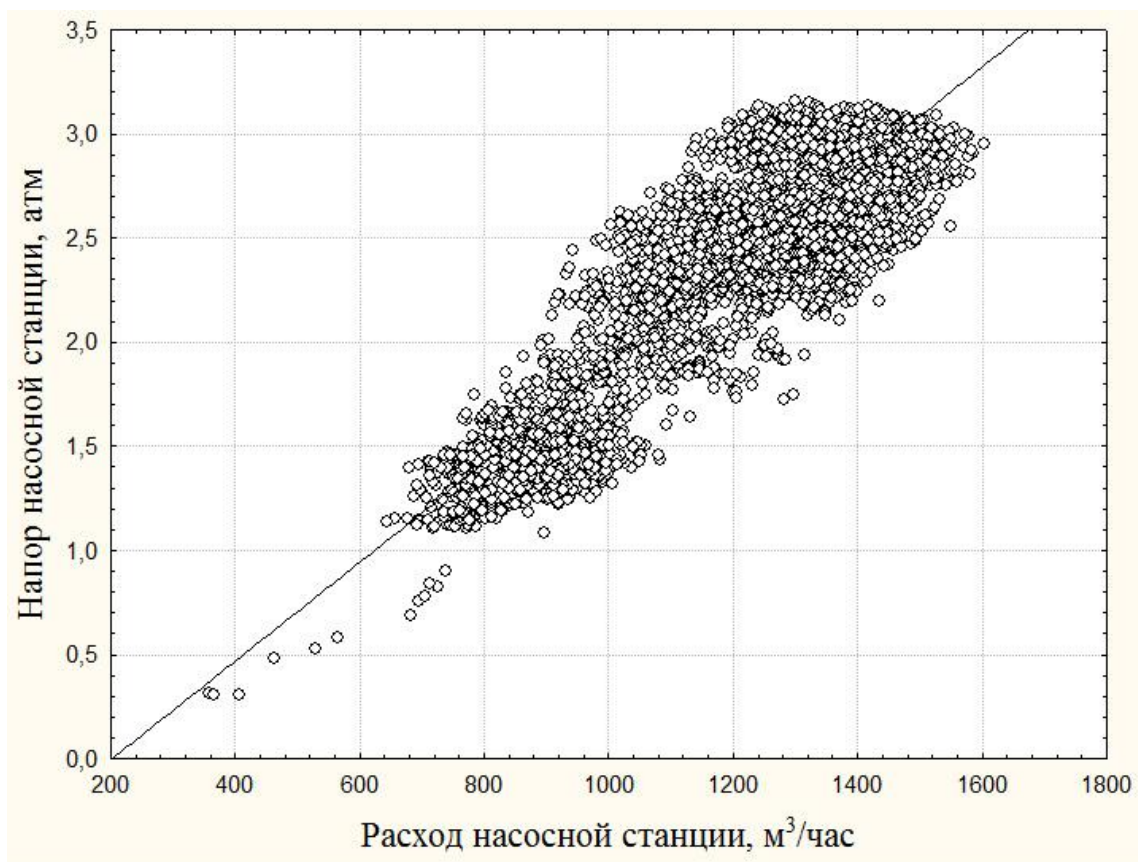


Рисунок 3.9 – Зависимость напора насосной станции от прокачиваемого расхода воды для водопроводного узла Северный

Временные функции модуляции для давления и расхода воды определялись опытным путем за счет реализации различных вариантов графиков управления оборудованием ВУ.

Данный алгоритм регулирования подачи воды потребителям в г.Донецке

предполагает ступенчатое изменение давления воды за счет автоматического регулирования насосного агрегата путем поддержания на гребенке постоянного давления воды:

- ночью с 23⁰⁰ до 6⁰⁰ давление воды на гребенке поддерживается равным 1,0 атм;
- утром с 6⁰⁰ до 10⁰⁰ – 2,8 атм;
- днем с 10⁰⁰ до 18⁰⁰ – 2,3 атм;
- вечером с 18⁰⁰ до 23⁰⁰ – 2,8 атм.

Регулирование по поддержанию эффективных режимов работы насосной станции осуществляется путем микропроцессорного управления частотными преобразователями, позволяющими изменять скорость вращения электродвигателей для обеспечения заданного давления на гребенке ВУ.

Алгоритм управления частотными преобразователями обеспечивает плавный переход в течении 20 мин от одного приведенного выше режима к другому. Это делается для исключения гидравлических ударов в трубопроводах водораспределительной сети при резком изменении давления, создаваемого насосной станцией.

Штатный режим работы насосного оборудования ВУ устанавливается путем применения следующего алгоритма. В процессе работы алгоритма блок идентификации параметров модели (3.6) периодически определяет коэффициенты a и b по данным, которые поступают от системы мониторинга режима работы ВУ. Осреднение осуществляется по предыдущим данным, получаемым за период времени с 23⁰⁰ до 6⁰⁰ и за период с 6⁰⁰ до 23⁰⁰. В случае, если фактические значения напора $\Delta h_{\phi}(t)$ насосной станции не попадают в допустимые интервалы регрессионной зависимости (3.4), которые определяются согласно (3.6), то считается, что технологический режим изменился и в результате анализа для предотвращения внештатных режимов АСУ ТП выдает сообщение диспетчеру для оценки ситуации и принятия решения.

Принятый алгоритм управления накоплением объемов воды на приходе ВУ предполагает обеспечение заданных уровней воды в накопительных резервуарах,

равных 4,2 – 4,6 метра, ко времени 6⁰⁰ для каждых новых суток. Контроль штатного режима ведется по изменению расхода на наливе, а управление водопритоком осуществляется по изменению уровня воды в накопительных резервуарах. На рис. 3.10 для примера показан график изменения уровня воды в резервуаре №3 ВУ Северный.

Как видно из рисунка расход воды на приходе в течении суток изменяется синусоидально. За счет применения автоматизированной задвижки на приходе ночью с 23⁰⁰ до 6⁰⁰ поступление в воды в резервуары увеличивается приблизительно в 1,2 – 1,3 раза по сравнению с дневным периодом, чем обеспечивается необходимый объем воды в резервуарах ВУ. Данные параметры функции модуляции расходов воды на приходе определены эмпирически путем длительной эксплуатации оборудования ВУ.

Приведенные алгоритмы управления позволяют обеспечить поддержание эффективных технологических режимов работы оборудования ВУ, дающих возможность экономии электроэнергии и воды.

Для защиты насосного оборудования ВУ от аварийных режимов был разработан алгоритм управления подобный тому, который применяется при обеспечении безопасной работы ПНС. Если расход на гребенке ВУ резко возрастает, то срабатывает система защиты. Это дает возможность исключить аварийные ситуации, связанные порывом магистральных трубопроводов, которые идут от ВУ. Аналогичным образом срабатывает защита, если резко растет давление на гребенке, что является причиной аварийной работы главных задвижек на подаче [82].

Защита насосного оборудования ВУ от аварийных режимов, связанных с возникновением кавитации, обеспечивается за счет обеспечения обязательного пожарного уровня воды в резервуарах, который не может быть ниже 2,0 метров.

При возникновении аварийной ситуации, связанной с прекращением подачи электроэнергии на ВУ, силовое оборудование автоматически переключается на обязательную резервную линию питания при одновременной выдаче сообщения диспетчеру.

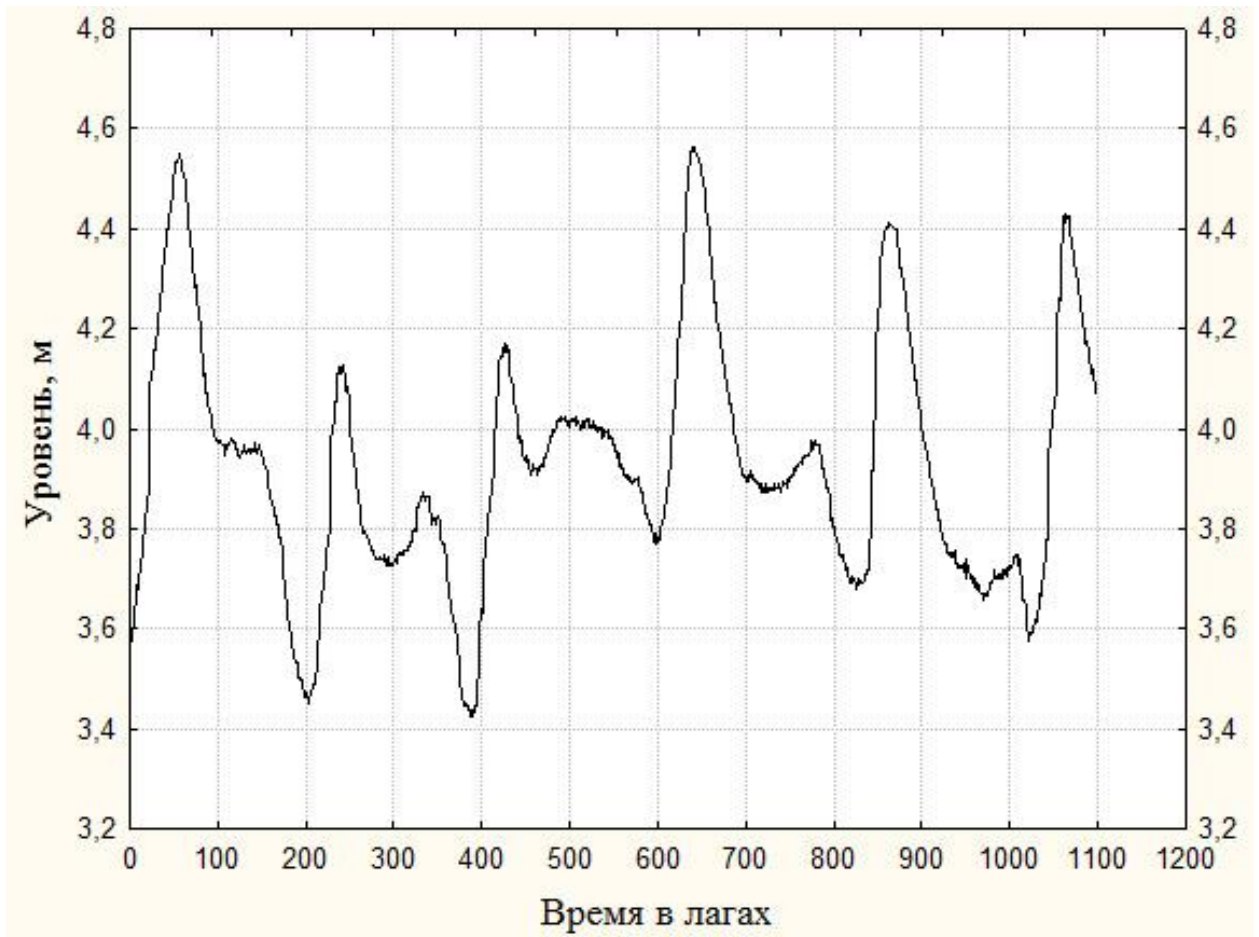


Рисунок 3.10 – Изменение уровня воды во времени в резервуаре № 3 ВУ Северный. Один лаг временного ряда – 5 минут

Алгоритмы управления работой ВУ реализованы в технологической системе управления режимами водоснабжения Киевского района г. Донецка.

Все приведенные выше в разделах 3.3.1 – 3.3.3 алгоритмы управления были организованы в виде модуля экспертной системы, которая при контроле диспетчера управляет работой городской системы водоснабжения. Экспертная система реализует принципы оперативно-диспетчерского управления на центральном уровне за счет сообщений, информирующих о возникновении внештатных режимов и аварийных ситуаций, которые поступают от подсистем управления ВУ, ПНС и контрольных точек. Опытная эксплуатация разработанной технологической системы мониторинга и управления распределенными объектами системы водоснабжения Киевского района города дала экономию электроэнергии – 18% и экономию воды – 8%.

На основе выполненных работ для снижения потребления энергии в 2004 – 2009 годах на предприятии КП «Донецгорводоканал» проведен целый ряд мероприятий по реконструкции и модернизации производственных объектов за счет значительных капиталовложений. В качестве первоочередных мероприятий произведена замена насосных агрегатов на водопроводных узлах, подкачивающих насосных станциях и в канализационном хозяйстве. На водопроводных узлах и КНС был установлен 21 преобразователь частоты большой мощности и модернизировано 29 насосов. На подкачивающих насосных станциях установлено 69 преобразователей частоты и проведена замена 76 насосных агрегатов. После модернизации объектов были проведены работы по внедрению разработанной автором технологической системы управления режимами водоснабжения на объектах города. В результате выполненных работ уменьшено потребление электроэнергии по предприятию с 107,9 млн. кВт·час до 79,7 млн. кВт·час электроэнергии в год (Рисунок 3.11). Внедрение комплекса мероприятий по энергосбережению позволило более чем на четверть уменьшить энергопотребление основного оборудования.

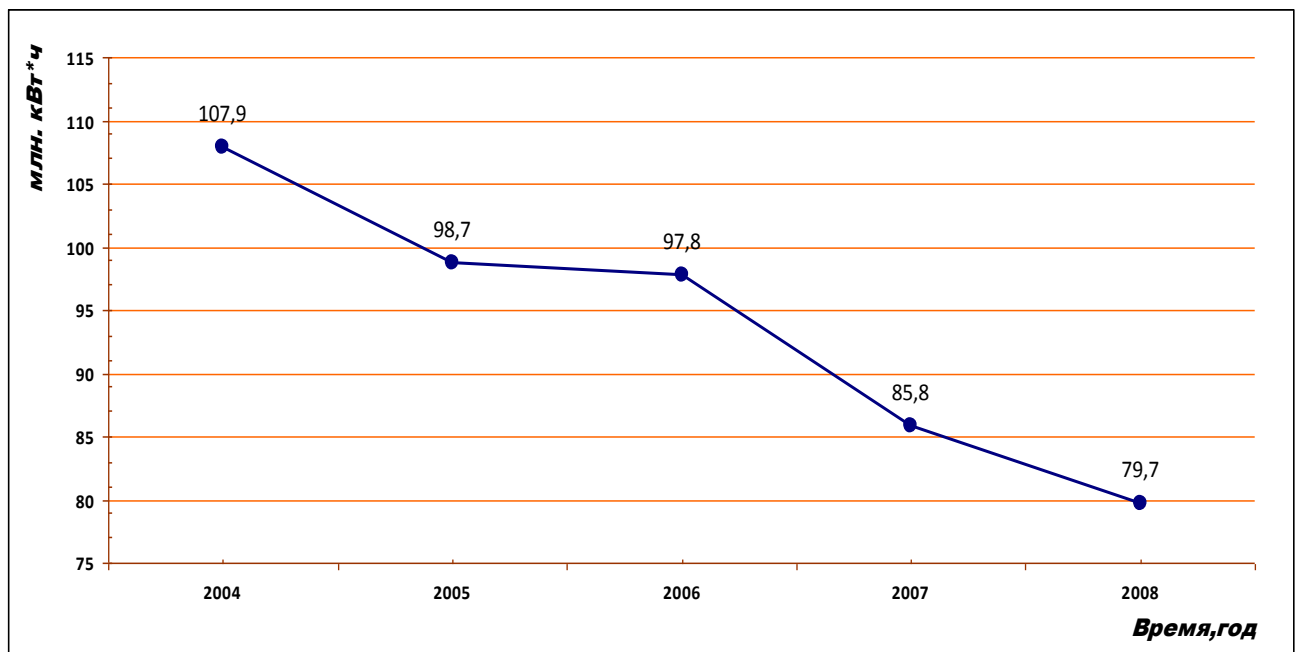


Рисунок 3.11 – Потребление электроэнергии КП «Донецгорводоканал» в 2004 – 2008 годах

С 2006 года СКТБ «Турбулентность» Донецкого национального университета участвует в работах по созданию АСУ ТП предприятия КП «Донецкгорводоканал». При участии автора, который был руководителем основных работ, связанных с АСУ ТП предприятия водоснабжения, выполнен комплекс мероприятий по развитию сети наблюдений, созданию системы передачи данных, а также внедрению средств диспетчеризации предприятия и управления технологическими процессами на локальных объектах.

Существующая на перспективу программа технологической модернизации предприятия предусматривает поэтапное развитие на все девять районов города, описанной выше системы мониторинга и управления технологическими процессами водоснабжения и водоотведения.

Полученные результаты явились основой при совершенствовании работы АСУ ТП водопроводных узлов городских предприятий водоснабжения.

3.4. Предсказательные модели систем управления режимами водоснабжения

Источником информации являются датчики давления, расположенные на насосных станциях, а также автономные системы измерения давления, расположенные в контрольных точках на водоводах сети. В рамках данной работы через x_i ($i=1..,5$) обозначены показатели давления воды на насосных станциях, через y_j ($j=1,2,3$) – на сетях.

Замеры производились автоматически каждые 30 мин. с передачей на сервер центральной диспетчерской по GPRS-каналу.

Временное окно полученных данных: с 14.02.2012 по 30.07.2012.

При решении поставленной задачи были выполнены следующие работы:

- проведен разведочный анализ данных для выявления выбросов и пропущенных значений, а также наличия связи между переменными;
- используя методы машинного обучения, построены предсказательные модели для показаний датчиков давления воды в неактивных точках водораспределительной сети;

- проведена оценка значимости предикторов для каждой модели;
- проведен анализ эффективности построенных моделей, используя в качестве критерия коэффициент детерминации:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum \hat{\varepsilon}_i^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2},$$

где $\hat{\varepsilon}_i$ – отклонения выборочных величин y_i переменной-отклика от значений \hat{y}_i , получаемых по модели, \bar{y} – среднее значение переменной-отклика y .

Для заполнения пропущенных значений и выбросов использовалась сплайновая интерполяция со сплайнами Акима.

Для выявления характера связи между переменными использовались матричные диаграммы рассеяния (Рисунок 3.12) [66]. Визуальный анализ выявил мультиколлинеарность переменных. Так, очевидна попарная линейная зависимость показаний, снятых с активных точек, а также показаний неактивной точки y_1 от всех остальных. Поведение переменной y_2 отличается от общей тенденции для y_1 и y_3 , y_2 имеет двумодальное распределение и большую дисперсию, в отличие от y_1 и y_3 , значения которых сосредоточены у максимума.

Были использованы два подхода к построению предсказательных моделей: на основе ансамблей классификаторов и нейросетевого подхода.

Для построения ансамбля классификаторов была выбрана техника градиентного бустинга над решающими деревьями.

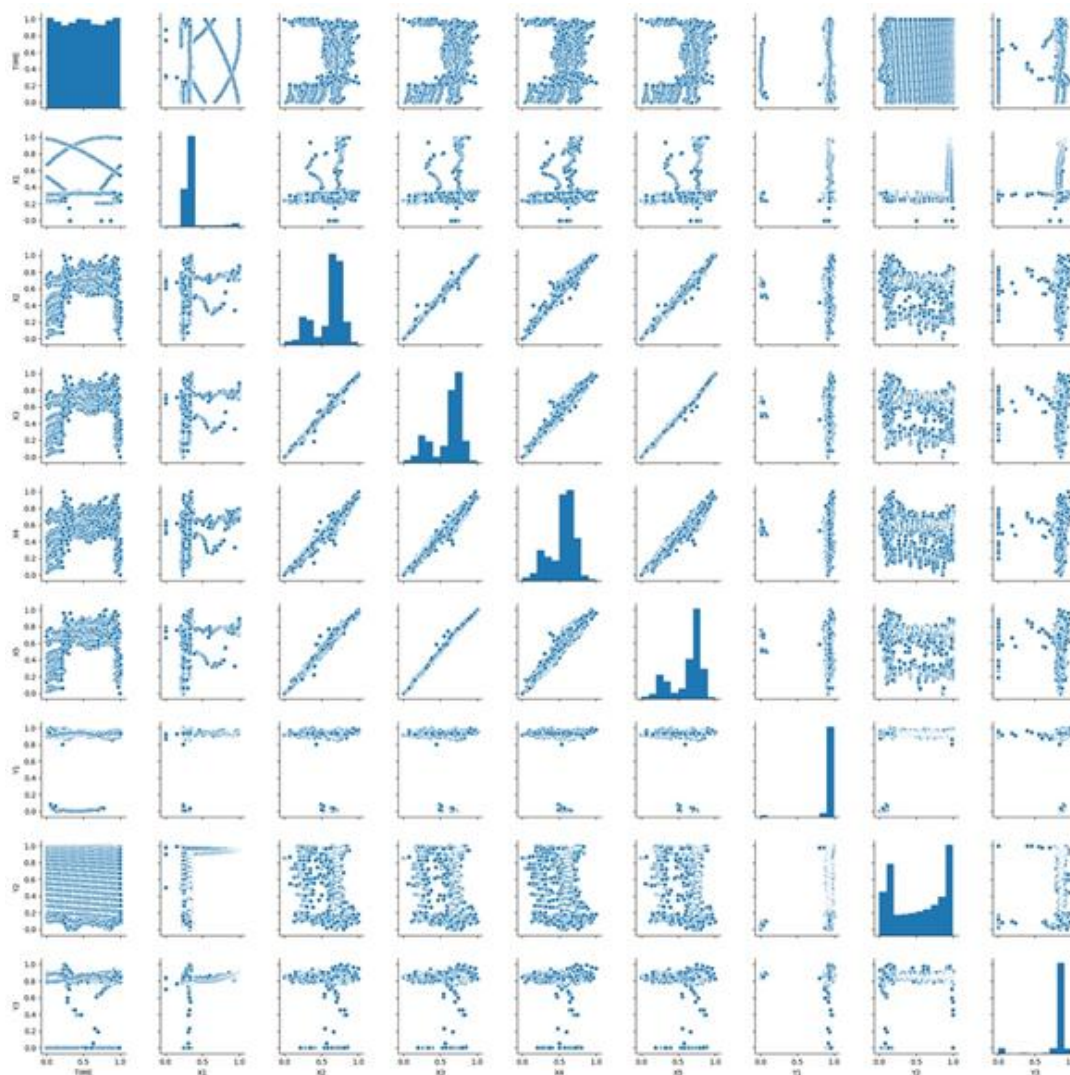


Рисунок 3.12 – Матричные диаграммы рассеяния, полученные для данных с заполненными пропусками

Используемые в работе параметры алгоритма градиентного бустинга следующие:

- функция потерь – квадратичная;
- скорость обучения 0.1;
- максимальная глубина дерева 3;
- число классификаторов 500;
- минимальная сумма весов объектов в листе 1.2. Увеличение этого параметра направлено на борьбу с переобучением.

Данные были разбиты на обучающую и тестовую выборки (доля обучающей выборки – 0.8). После чего были построены три модели, в качестве переменной-отклика поочередно брались $y_j(j=1,2,3)$. Оценка эффективности каждой модели проводилась с помощью коэффициента детерминации R^2 , в таблице 3.2 приведены значения R^2 , полученные по тестовой и обучающей выборке для трех моделей.

Таблица 3.2 – Оценка эффективности моделей градиентного бустинга

Отклик \ Выборка	y1	y2	y3
Обучающая	0.997222081366871	0.9959418046593616	0.960156341153223
Тестовая	0.9955615264454241	0.9923361152018203	0.9037186382663568

По рисунку 3.13 можно визуальнo оценить результаты прогнозирования каждой из моделей, на рисунках отображены предсказанные (pred) и реальные (test) нормированные значения тестовой выборки для переменных-откликов y_1 - y_3 , взятые за одни сутки.

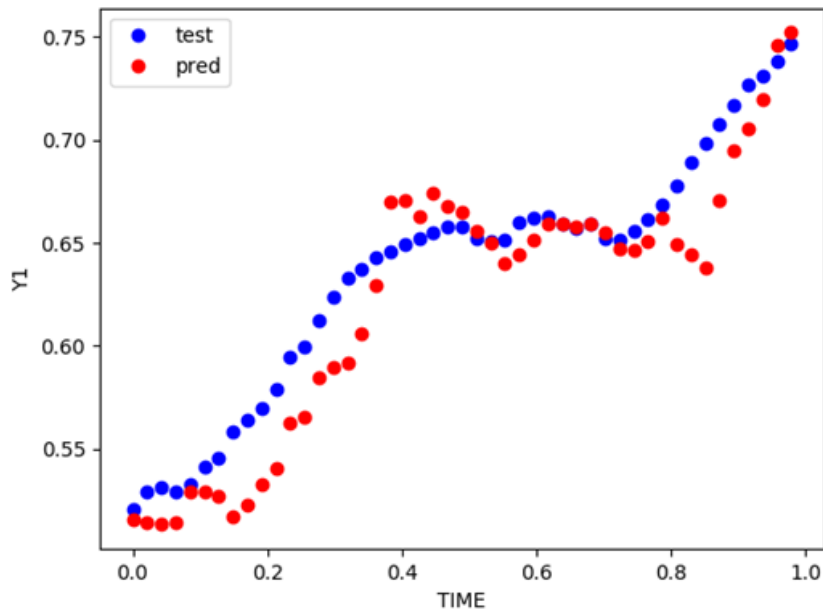


Рисунок 3.13 – Диаграмма рассеяния между нормированными переменными time и y1, построенная для реальных и предсказанных значений переменной-отклика y

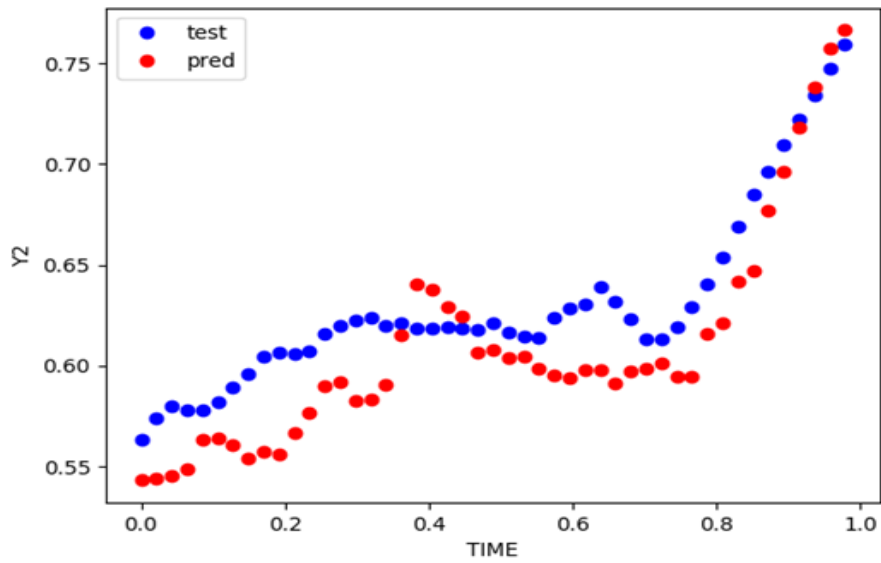


Рисунок 3.14 – Диаграмма рассеяния между нормированными переменными $time$ и u_2 , построенная для реальных и предсказанных значений переменной-отклика u

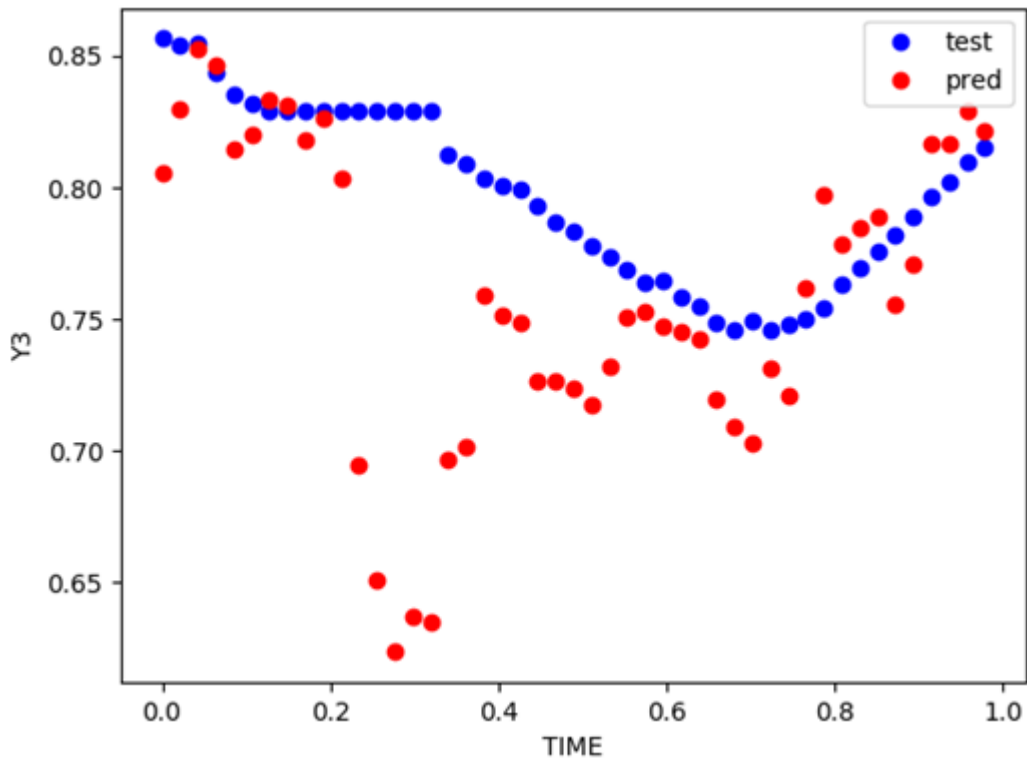


Рисунок 3.15 – Диаграмма рассеяния между нормированными переменными $time$ и u_3 , построенная для реальных и предсказанных значений переменной-отклика u

Для каждой модели оценивалась важность предикторов, используя алгоритм Random Forest (случайный лес). Random Forest представляет собой ансамбль многочисленных деревьев решений [40].

Алгоритм обучают на выборке и во время построения модели Random Forest для каждого элемента обучающей выборки вычисляется out-of-bag-ошибка – усредненная оценка функции потерь базовых алгоритмов на тех данных, на которых они не обучались. Чтобы оценить важность предиктора, его значения перемешиваются для всех объектов обучающей выборки, и out-of-bag-ошибка считается снова. Важность предиктора оценивается путем усреднения по всем деревьям разности показателей out-of-bag-ошибок до и после перемешивания значений.

На рисунках 3.16-3.18 приведены результаты оценки важности предикторов. Предикторы расположены по убыванию степени важности.

Для построения нейросетевой модели использовались рекуррентные нейросети (Recurrent Neural Networks, RNN).

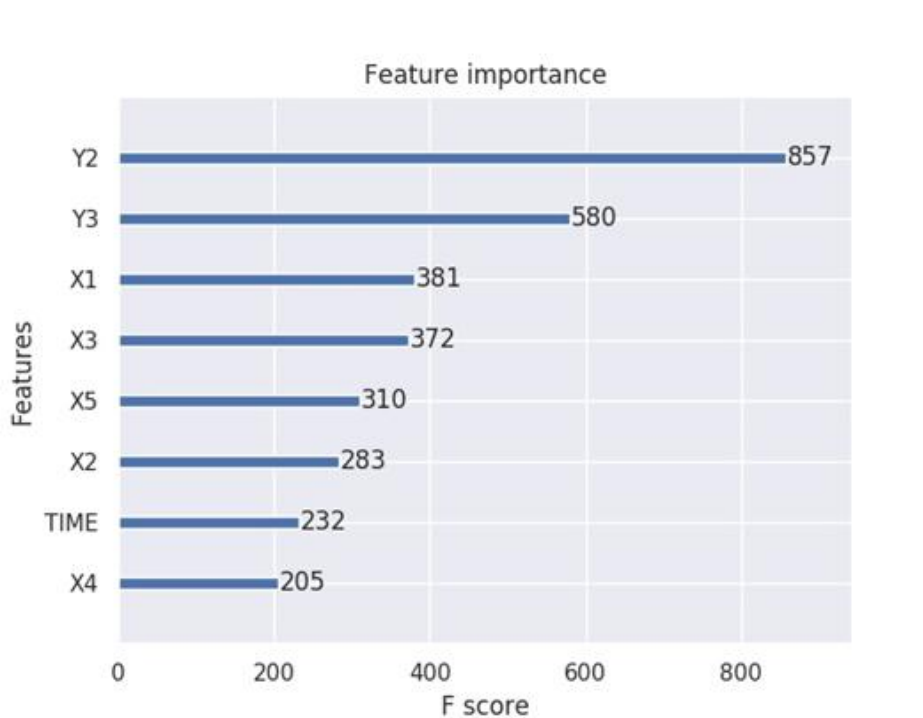


Рисунок 3.16 – Оценка важности предикторов для модели с переменной-откликом y_1

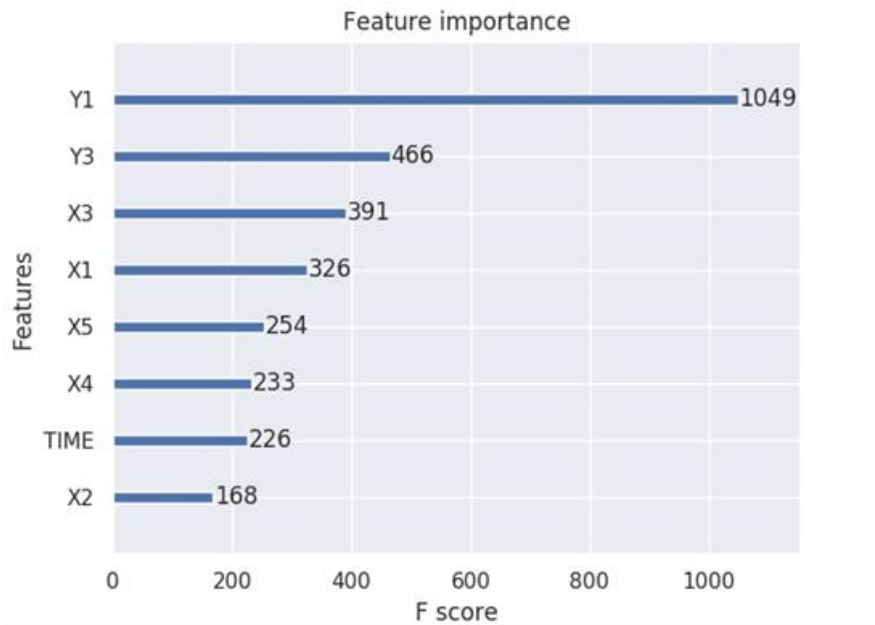


Рисунок 3.17 – Оценка важности предикторов для модели с переменной-откликом y_2

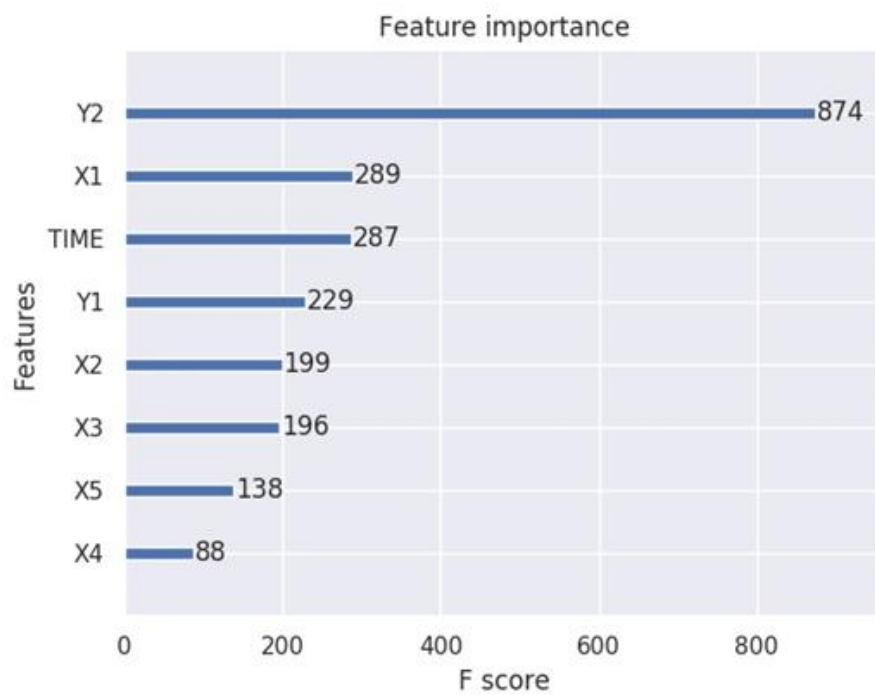


Рисунок 3.18 – Оценка важности предикторов для модели с переменной-откликом y_3

В данной работе, поскольку анализируемые данные представляют собой временные ряды, использовалась BLSTM-сеть, архитектура которой показана на рисунке 3.19. Входная последовательность $(t, x_1(t), x_2(t), \dots, x_5(t))$, где $x_i(t)$ – показания датчика активной i -той точки в момент времени t . Выходная последовательность – $(y_1(t), y_2(t), y_3(t))$, где $y_j(t)$ прогнозируемые показания датчика неактивной j -той точки.

Предварительно данные масштабировались с помощью алгоритма min-max. Масштабированные значения для временного ряда $\{x_t\}$ имеют следующий вид:

$$\frac{x_t - \min(x)}{\max(x) - \min(x)}.$$

Этот алгоритм применяется для случаев, когда распределение значений входных данных не является нормальным (в случае наших данных распределение далеко от нормального (см. диагональные элементы рисунке 3.12)) и в данных нет выбросов.

Рисунок 3.19 демонстрирует окончательную архитектуру нейросети, которая содержит 9 скрытых слоев. В таблице 3.3 приведены значения коэффициента детерминации R^2 , полученные по тестовой и обучающей выборке для нейросетевых моделей с различным числом скрытых слоев.

Таблица 3.3 – Оценка эффективности нейросетевых моделей

выборка	4 скрытых слоя	9 скрытых слоев
обучающая	0.976436197757721	0.9995164275169373
тестовая	0.9750288128852844	0.9972876906394958

Как видно из таблицы 3.3, увеличение слоев повышает эффективность модели.

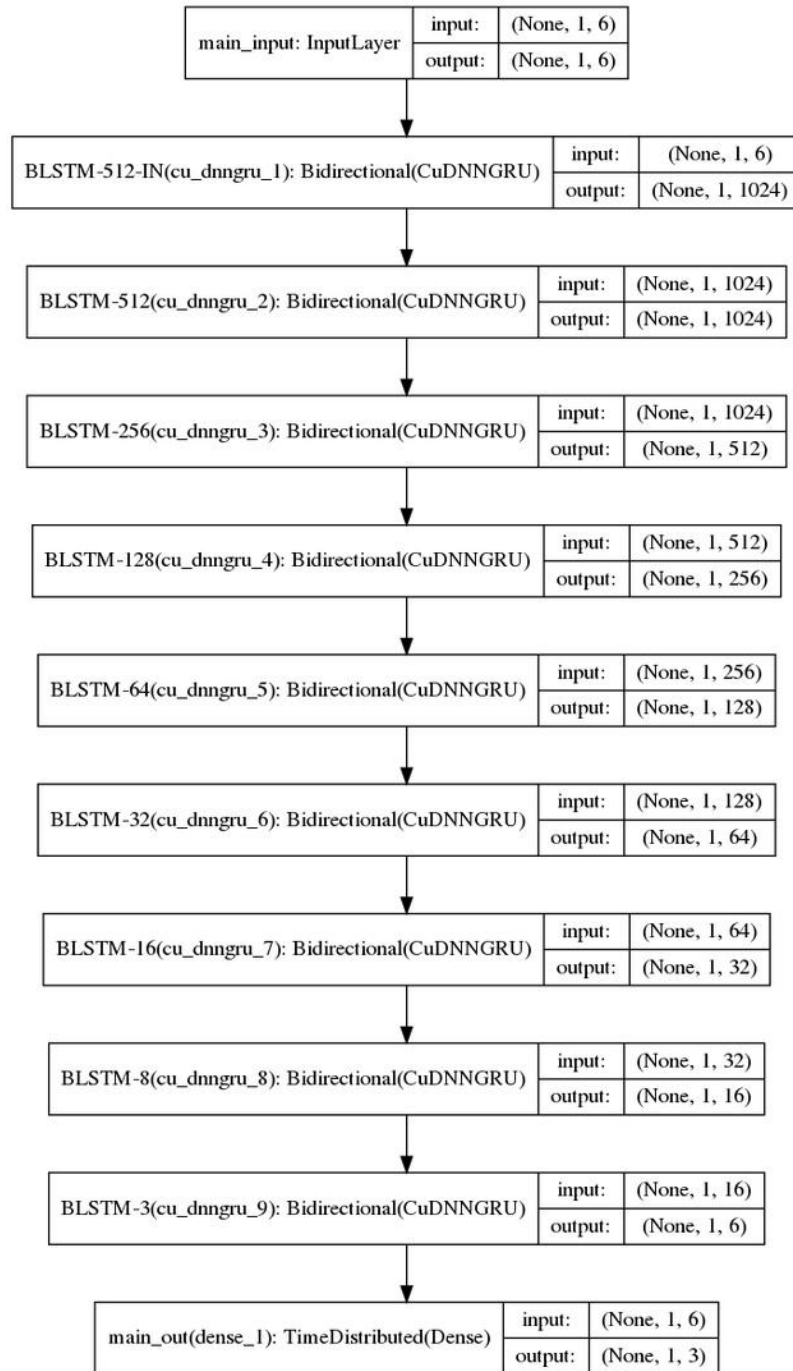


Рисунок 3.19 – Архитектура BLSTM-сети, используемая для прогноза показаний датчиков в неактивных точка.

Значения предсказанных (*pred*) и реальных (*test*) нормированных значений y_1 - y_3 в зависимости от нормированной переменной *time* приведены на рисунках 3.20-3.22.

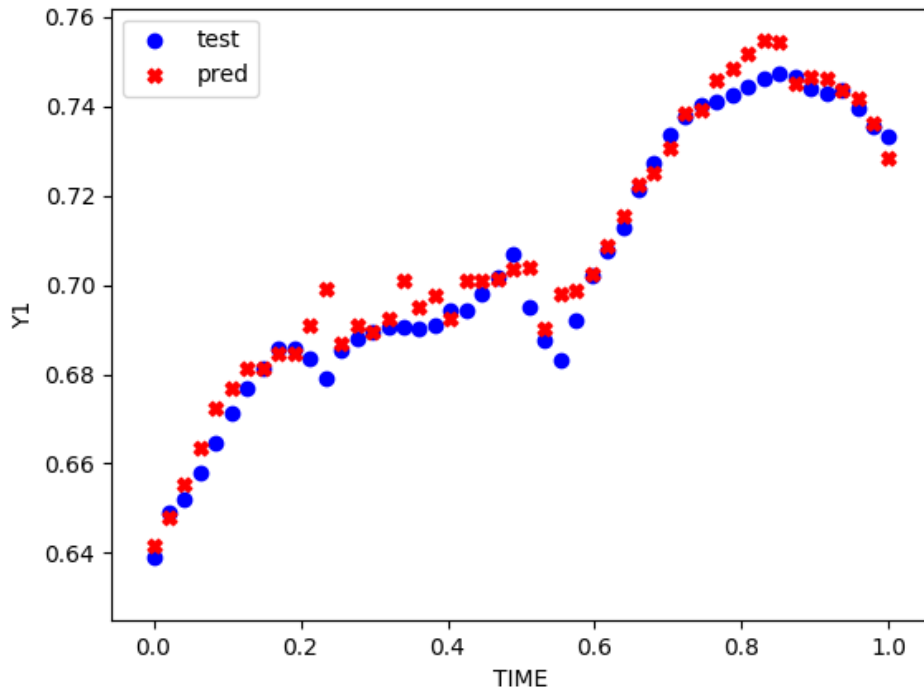


Рисунок 3.20 – Нормированные значения из тестовой выборки за сутки и значения, полученные нейросетевой моделью, для переменной y_1

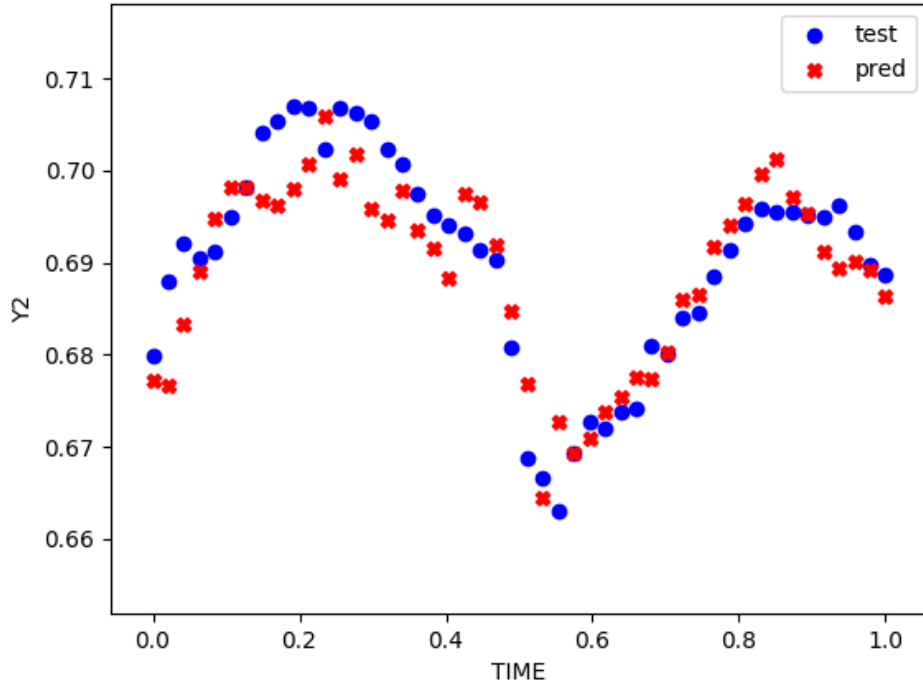


Рисунок 3.21 – Нормированные значения из тестовой выборки за сутки и значения, полученные нейросетевой моделью, для переменной y_2 .

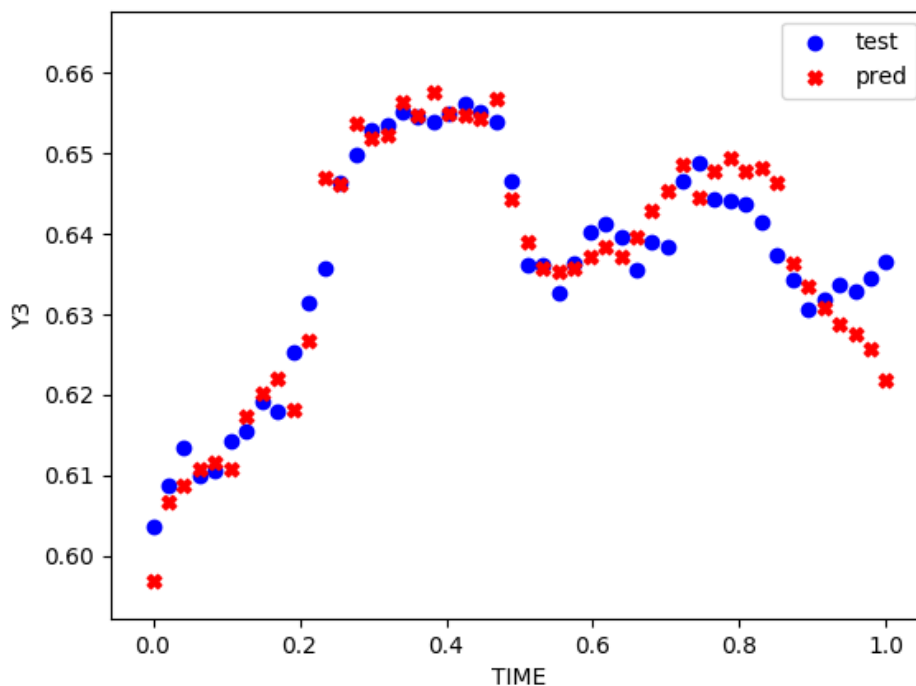


Рисунок 3.22 – Нормированные значения из тестовой выборки за сутки и значения, полученные нейросетевой моделью, для переменной uz

Сравнивая рисунок 3.15 и рисунок 3.22, можно сделать вывод о большей точности нейросетевой модели и о верном выборе типа нейросети – BLSTM, способной, в отличие от деревьев решений, учитывать для предсказания текущих значений временных последовательностей их контекст и слева, и справа.

Общее количество параметров для сети, архитектура которой приведена на рисунке 3.19, равно 8949423, время обучения 5-10 минут 1000 эпох. Зависимость значения коэффициента детерминации от количества эпох обучения показана на рисунке 3.23.

На рисунках 3.24 – 3.25 показана зависимость значений различных функций потерь от количества эпох обучения, полученных на тестовой выборке. Обозначения на рисунках: y' – предсказанные значения выхода сети, y – значения тестовой выборки, n – объем тестовой выборки.

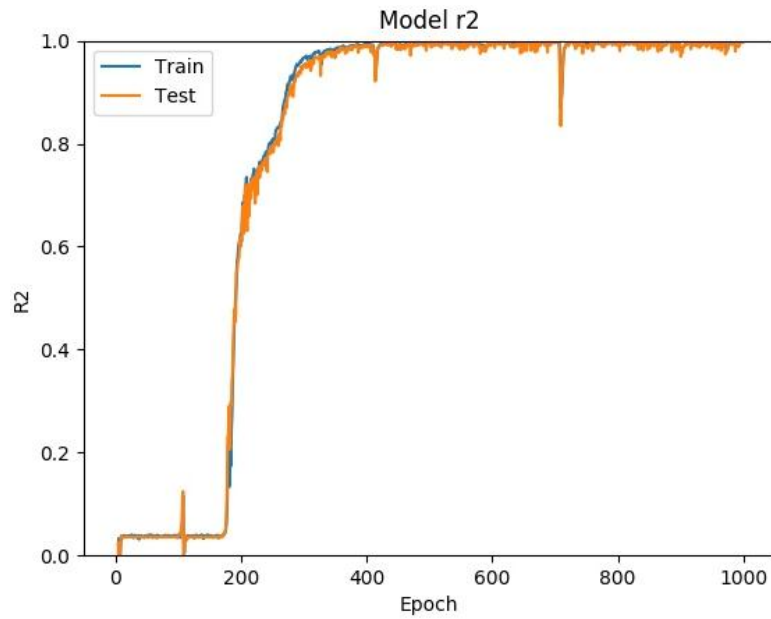


Рисунок 3.23 – График зависимости R2 от количества эпох обучения BLSTM-сети

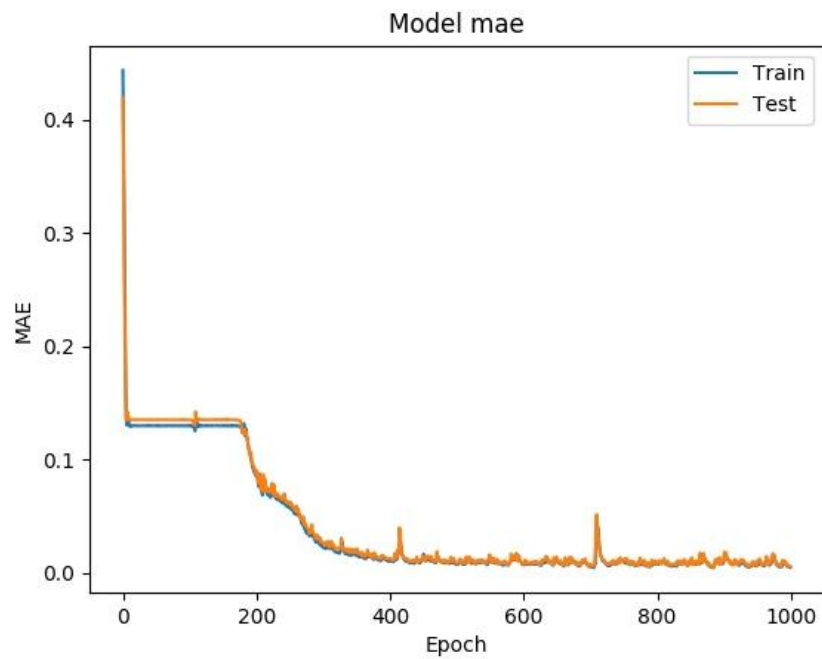


Рисунок 3.24 – График зависимости функции потерь MAE от количества эпох обучения BLSTM-сети

$$L(y', y) = \frac{1}{n} \sum_i |y'_i - y_i|$$

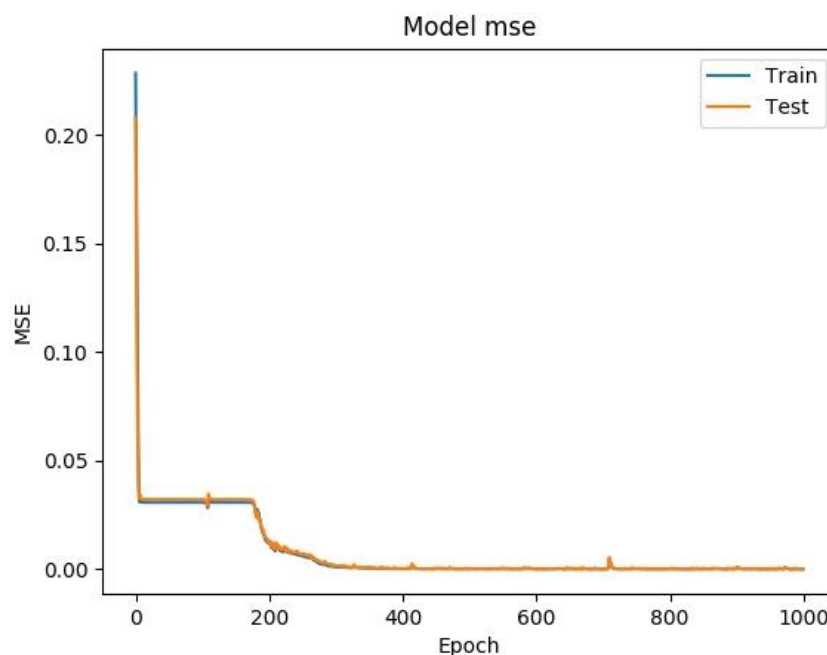


Рисунок 3.25 – График зависимости функции потерь MSE $L(y', y) = \frac{1}{n} \sum_i (y'_i - y_i)^2$ от количества эпох обучения BLSTM-сети

Было проведено исследование важности предикторов с помощью нейросети по следующему алгоритму:

- обучение нейросети.
- тестирование нейросети на тестовой выборке.
- вычисление среднего значения для каждой входной переменной.
- поочередное значение целевой функции при фиксировании каждого входа тестовой выборки.
- анализ значений целевой функции.

В качестве целевой функции использовалась функция потерь MSE. Чем больше значение целевой функции, тем важнее предиктор. Результаты исследования сведены в таблицу 3.4, где указаны значения MSE при фиксированном входе.

Таблица 3.4 – Значения функции потерь при фиксированных входах нейросети

time	x1	x2	x3	x4	x5
2.2289617	1.7885027	2.1235294	1.9561572	1.9372189	0.097451

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что время (time) для BLSTM-сети наиболее важный признак [18].

3.5. Выводы по разделу

По результатам данного раздела можно сделать следующие выводы.

1. На основе длительной эксплуатации системы мониторинга и управления оборудованием водопроводных узлов, подкачивающих насосных станций и участков водораспределительных систем, сформулированы задачи оперативного управления по поддержанию эффективных технологических режимов, а также задачи распознавания внештатных режимов и аварийных ситуаций. Это позволило разработать информационные модели систем водоснабжения с множественными элементами автоматического регулирования, которые включают в себя:

- статистические модели объектов водоподачи и водораспределения, адекватно отражающие закономерности водоснабжения;
- информационные базы данных ретроспективной и текущей технологической информации, собранной системой мониторинга;
- алгоритмы управления работой оборудования и средствами регулирования, которые реализуют эффективные технологические режимы;
- алгоритмы распознавания внештатных технологических режимов и алгоритмы защиты от возникновения аварийных ситуаций.

2. С целью построения предсказательной модели значений давления воды в контрольных точках водопроводной сети проведен разведочный анализ данных для выявления выбросов и пропущенных значений, а также наличия связи между переменными. При этом была выявлена мультиколлинеарность переменных.

Построены предсказательные модели для показаний датчиков давления воды в неактивных точках водораспределительной сети на основе ансамблей классификаторов и нейросетевого подхода.

Произведена оценка значимости предикторов для каждой модели. Для модели на основе ансамблей классификаторов использовали алгоритм Random Forest, для нейросети-анализ значений целевой функции. Высокая корреляция между показаниями датчиков в неактивных точках отразилась на оценке важности предикторов, полученных для моделей бустинга.

Проведен сравнительный анализ качества построенных моделей с использованием коэффициента детерминации. При этом метод градиентного бустинга и BLSTM-сети дают ошибку, близкую к нулю (менее 0,01).

3. Определены временные функции модуляции параметров и разработаны алгоритмы управления водопроводными узлами и подкачивающими насосными станциями, позволяющие поддерживать эффективные технологические режимы работы оборудования, которые обеспечивают экономию электроэнергии и воды. Предложены алгоритмы распознавания внештатных технологических режимов и алгоритмы защиты от возникновения аварийных ситуаций при эксплуатации насосного оборудования и водопроводных сетей. Разработанные алгоритмы управления организованы в виде модуля экспертной системы, которая при участии диспетчера управляет работой городской системы водоснабжения. Экспертная система реализует принципы оперативно-диспетчерского управления на центральном уровне за счет сообщений, информирующих о возникновении внештатных режимов и аварийных ситуаций, которые поступают от подсистем управления ВУ, ПНС и контрольных точек.

4. Выполненные исследования позволили сформулировать третье научное положение диссертационной работы в следующем виде: разработана методология мониторинга и управления процессами водоснабжения городов, направленная на повышение эффективности и экономичности работы городских водораспределительных систем, а также распознавание внештатных режимов и аварийных ситуаций. Информационная технология реализует способы

адаптивного микропроцессорного управления режимами водоснабжения на объектных уровнях и оперативно-диспетчерского управления на центральном уровне и отличается интегрированным совмещением способов управления на объектных уровнях в зависимости от сложности объектов управления, интенсивности потоков информации и значимости данных, генерируемых в системе мониторинга технологических режимов, и применением экспертной системы на центральном уровне. Использование экспертной системы позволяет повысить обоснованность и оперативность принятия управленческих решений при возникновении внештатных режимов и аварийных ситуаций, а микропроцессорное управление обеспечивает эффективность и экономичность процессов водораспределения и водоподачи.

РАЗДЕЛ 4

СОЗДАНИЕ ТЕРРИТОРИАЛЬНО-РАСПРЕДЕЛЕННЫХ АСУ ТП ВОДОСНАБЖЕНИЯ ГОРОДОВ

4.1 Развертывание автоматизированных систем управления технологическими процессами предприятий водоснабжения

На основе автоматизированной системы водоснабжения Киевского района города Донецка, которая представлена в разделах 2 и 3, может быть развернута и адаптирована к конкретным условиям территориально-распределенная АСУ ТП водоснабжения любого уровня сложности. Иерархический и модульный принципы построения такой АСУ ТП позволяют создавать автоматизированные системы диспетчерского контроля и управления водоснабжением для городов с различной численностью населения. В архитектуру подобной территориально-распределенной АСУ ТП изначально заложены возможности объединения отдельных автономных подсистем в единую городскую систему на базе использования сетевых технологий. При этом ее топология соответствует принципам построения централизованной системы, и ее архитектура удовлетворяет следующим требованиям.

Территориально-распределенная система представляет собой 4-х ступенчатую иерархическую структуру, у которой на верхнем уровне находится центральный сервер базы данных. Программное обеспечение центрального сервера осуществляет поддержку работы центральной диспетчерской и обеспечивает доступ различных пользователей в соответствии с уровнями доступа к информации базы данных. Системы водоснабжения отдельных территорий или районов города охвачены 3-х уровневыми автономными АСУ ТП, которые включают в состав локальные диспетчерские водопроводных узлов и городских канализационных насосных станций (ГКНС), диспетчерские водопроводно-канализационных служб и АСУ локальных объектов мониторинга и управления водоснабжением. Автономные АСУ ТП представляют собой

технологические аналоги АСУ ТП Киевского района города Донецка, в которых структура конфигурируется, а программное, технологическое и техническое обеспечение адаптируется к конкретным условиям отдельной территории или объекта водоснабжения.

Благодаря аккумуляции всей информации на верхнем уровне и использованию сетевых технологий и Web-технологий АСУ ТП получает новое качество – доступность всех объектов мониторинга и управления на центральном уровне. Аналогично обеспечивается мониторинг объектов на уровне автономных систем АСУ ТП определенных территорий с доступом из диспетчерской любой водопроводно-канализационной службы, а также из профильного отдела райисполкома конкретного района города.

Представленная методология построения автоматизированных систем использована при создании АСУ ТП водоснабжения городов Донецк и Харцызск.

На рисунке 4.1 приведена организационная схема АСУ ТП водоснабжения города Донецка. АСУ ТП предприятия водоснабжения «Донецкгорводоканал» имеет один центральный диспетчерский пункт, представленный на рисунке 4.2, девять локальных диспетчерских, размещенных на восьми водопроводных узлах и одной ГКНС, и восемь диспетчерских водопроводно-канализационных служб предприятия, которые размещены в каждом районе города. При этом на всей территории города рассредоточено находится 177 крупных объектов контроля и управления технологическими процессами. На рисунке 4.3 приведена основная сеть наблюдений и объектов управления, созданная в процессе развития системы технологического мониторинга КП «Донецкгорводоканал». В приложении А представлена общая организационная структура предприятия совместно со структурой корпоративной информационной системы, обеспечивающей поддержку технологических процессов.

На центральном диспетчерском пункте имеется доступ ко всей информации системы и средствам управления оборудованием. На локальных диспетчерских водопроводных узлов или ГКНС машинист имеет доступ к информации и управлению оборудованием только своего объекта. В районных диспетчерских

водопроводно-канализационных служб имеется доступ только к информации, которая поступает от технологических объектов своего района. На ПНС осуществляется автоматическое управление оборудованием с мониторингом режимов его работы.

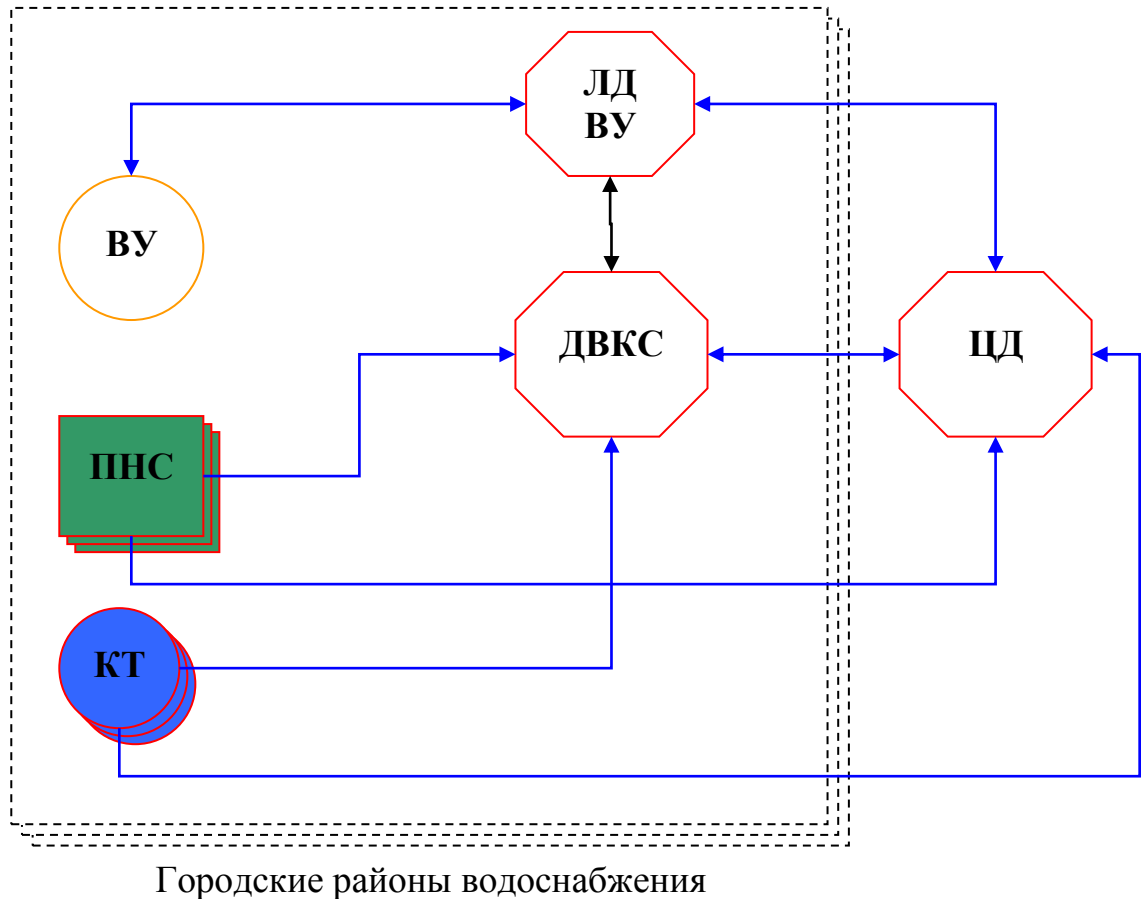


Рисунок 4.1 – Организационная схема АСУ ТП предприятия «Донецгорводоканал»

ДКВС – диспетчерские водопроводно-канализационных служб; ВУ – водопроводные узлы; ПНС – подкачивающие насосные станции; КТ – контрольные точки; ЛДВУ – локальная диспетчерская водопроводного узла; ЦД – центральная городская диспетчерская.

Системы мониторинга и управления технологическими объектами – ВУ, ПНС и контрольных точек, являются типовыми и их характеристика дана в разделах 2 и 3. Информационная система городской канализационной насосной станции представлена на рисунках 4.4 – 4.5. Количество средств мониторинга,

которые размещены на ГКНС составляет 167 шт. (датчики расхода и уровня сточных вод, температуры и химических параметров воды, растворенного кислорода и т.д.).

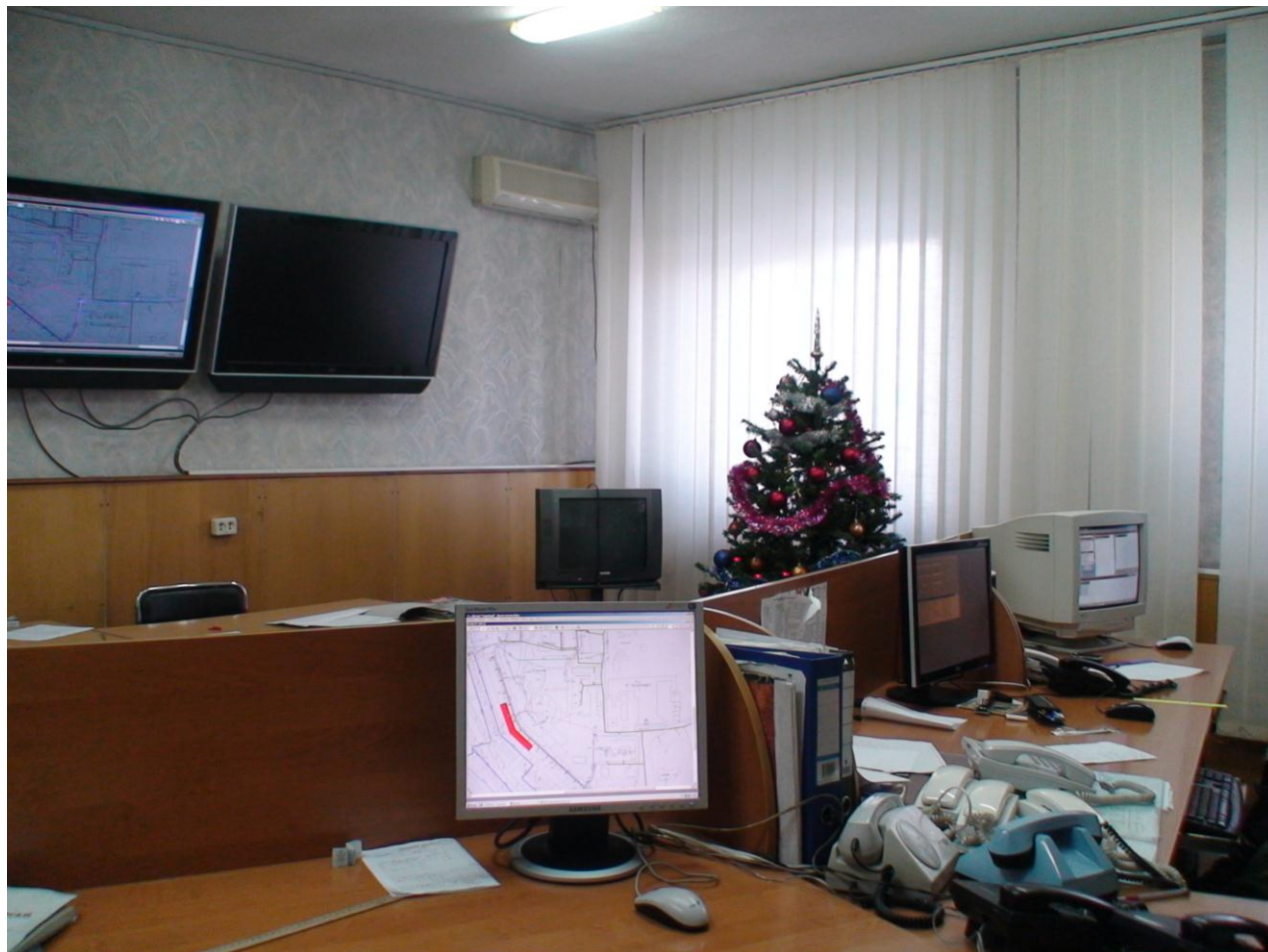


Рисунок 4.2 – Центральный диспетчерский пункт КП «Донецгорводоканал»

Основные данные о внедренной в промышленную эксплуатацию в КП «Донецгорводоканал» АСУ ТП приведены в таблице 4.1. В настоящее время единая автоматизированная система управления технологическими процессами КП «Донецгорводоканал» является одной из наиболее развитых АСУ ТП предприятий водоснабжения в ДНР.

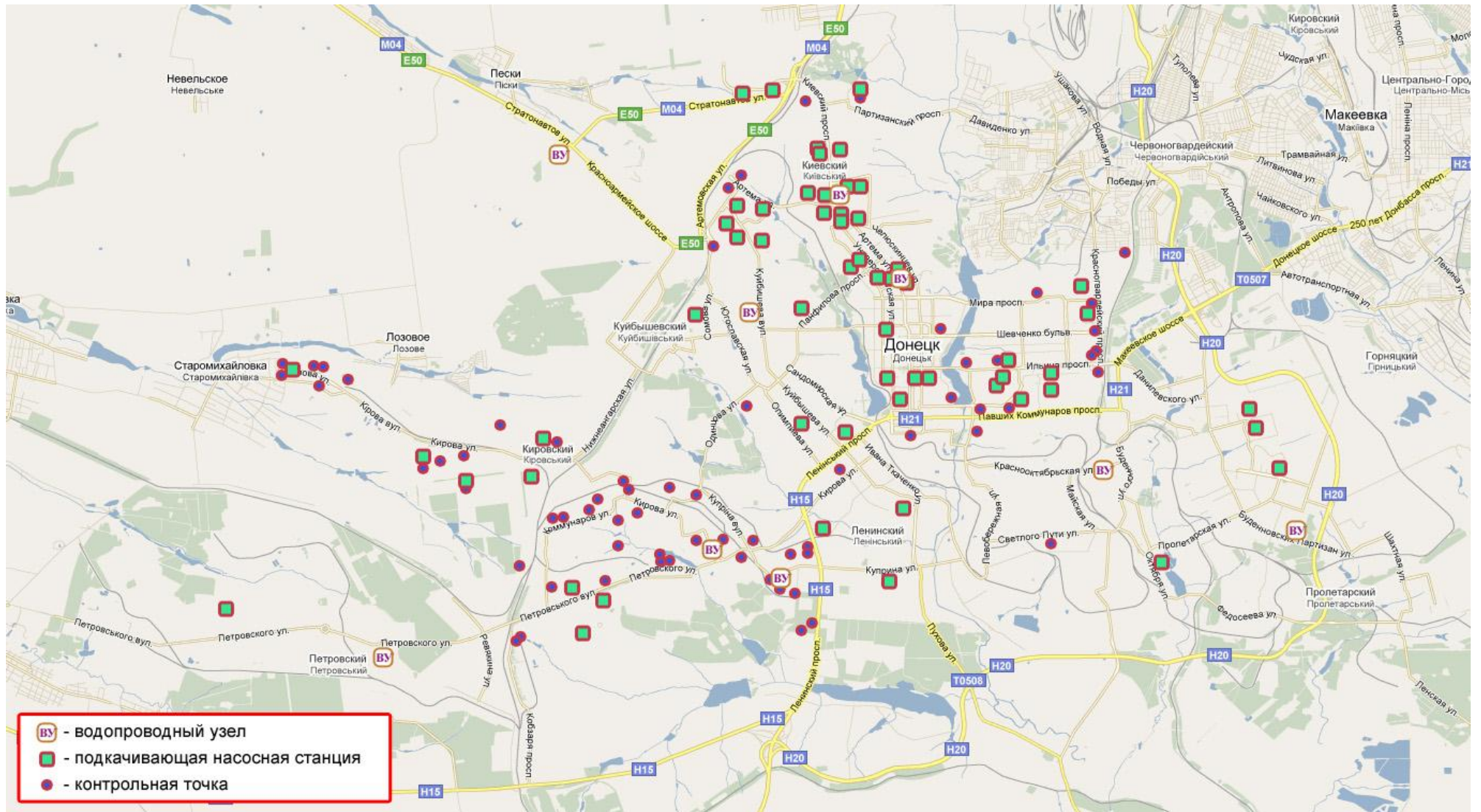


Рисунок 4.3 – Сеть наблюдений и управления системы технологического мониторинга КП «Донецгорводоканал»

Таблица 4.1 – Данные об АСУ ТП водоснабжения города Донецка

№	Характеристики и показатели	Единица измерения	Базовые значения
1	2	3	4
1.	Площадь территории, где размещены объекты мониторинга и управления АСУ ТП	кв. км.	530
2.	Количество точек (объектов) мониторинга, в том числе:	шт.	177
	– ВУ		8
	– ГКНС		1
	– ПНС		61
	– других объектов (сети, котельные)		107
3.	Количество средств мониторинга, в том числе	шт.	796
	– датчиков расхода		98
	– датчиков давления		198
	– датчиков технологических устройств		320
	– других средств мониторинга и контроля		180
4.	Количество объектов управления, в том числе:	шт.	117
	– по водопроводным узлам		42
	– по ПНС		73
	– других объектов управления		2
5.	Общий объем данных, накапливаемых АСУ ТП	изм./год	около 2,5·10 ⁶

По аналогии с АСУ ТП КП «Донецкгорводоканал» и на основе использования компонентов этой автоматизированной системы была развернута и адаптирована под конкретные условия автоматизированная система в КП «Харцызкгорводоканал». На рисунке 4.6 показаны основные объекты мониторинга и управления данного предприятия водоснабжения.

В КП «Харцызкгорводоканал» АСУ ТП охватывает территорию 50 кв. км. На данной территории рассредоточено размещено 9 объектов мониторинга и управления технологическими процессами водоснабжения. Данная система имеет 20 средств мониторинга. Они размещены на водопроводных узлах и контрольных точках и включают в себя измерители давления и расхода. Система сбора информации организована на базе одноплатного компьютера ICOP. Система передачи информации – на базе радиомодема и радиостанции «Лен». Одна измерительная система

организована на диспетчерском пункте, программное обеспечение было адаптировано под совмещение локальной и центральной диспетчерских.

Таким образом, технологическая апробация результатов работы на ряде городских предприятий водоснабжения ДНР позволяет сделать вывод о возможности развертывания единых АСУ ТП, которые имеют открытую архитектуру и обеспечивают системность внедрения технических решений.



Рисунок 4.4 – Система мониторинга городской канализационной насосной станции КП «Донецгорводоканал»

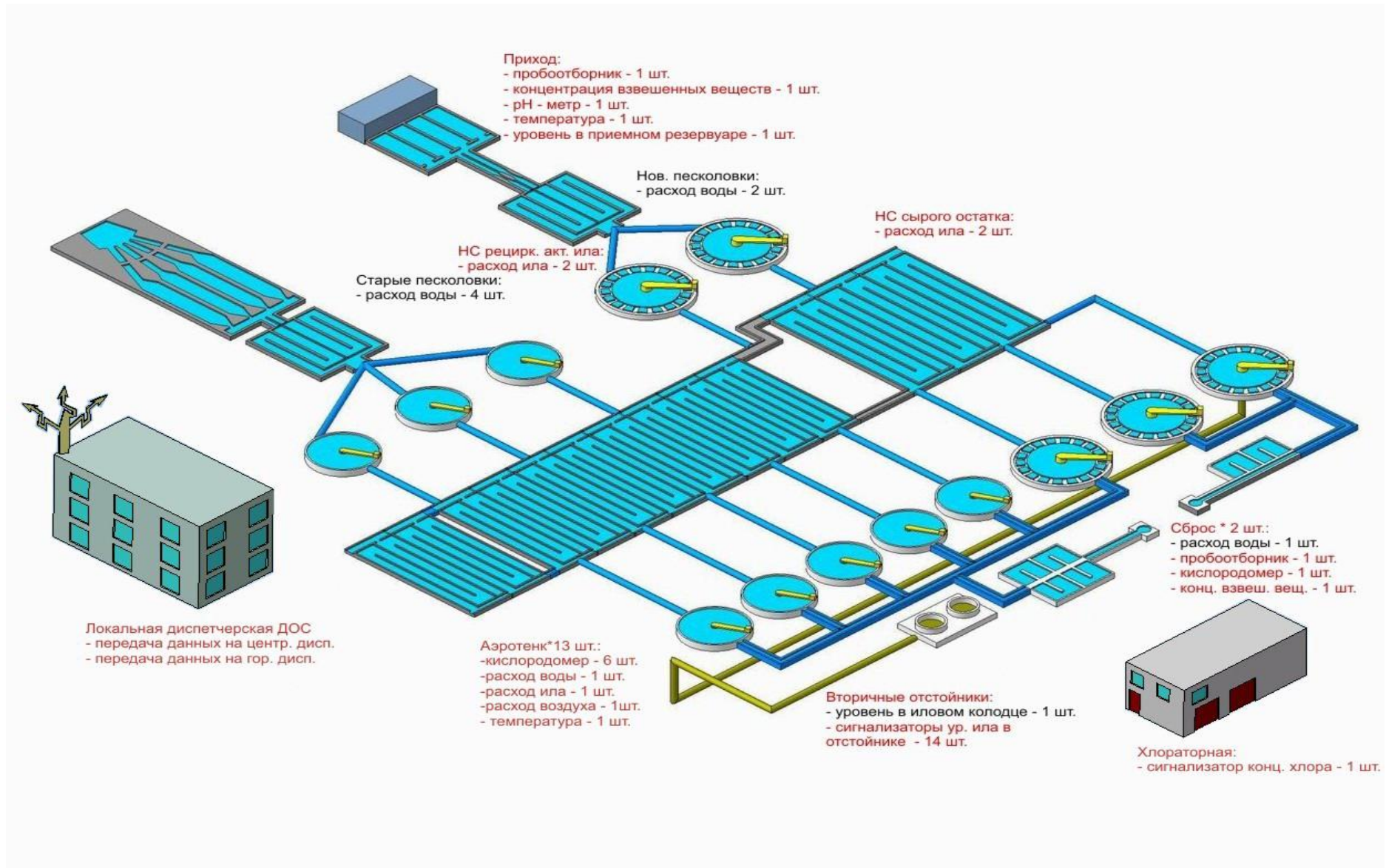


Рисунок 4.5 – Подсистема АСУ ТП работы очистных сооружений КП «Донецгорводоканал»

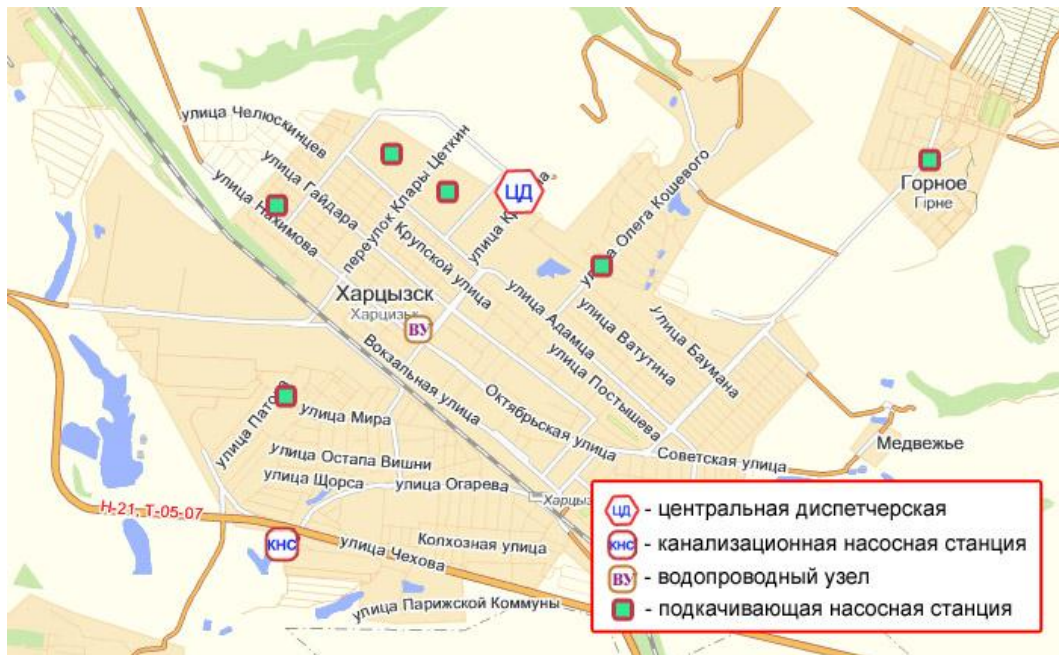


Рисунок 4.6 – Система мониторинга и управления водоснабжением КП «Харцызскгорводоканал»

4.2 Внедрение результатов работы и пути развития системы

Разработанные в диссертационной работе методы, алгоритмы и аппаратно-программные средства внедрены на предприятиях водоснабжения городов Донецк и Харцызск. Полученные результаты явились основой при совершенствовании АСУ ТП городских предприятий водоснабжения:

- в КП «Донецкгорводоканал» при модернизации существующей системы водоснабжения города Донецка и создании системы технологического мониторинга и автоматического управления водоснабжением города нового технического уровня [22,87,103];

- в КП «Харцызскгорводоканал» при реконструкции системы водоснабжения города Харцызск и создании подсистемы моделирования режимов

работы городской водораспределительной системы, позволяющей определить оптимальные режимы функционирования системы в реальном масштабе времени.

Акт внедрения результатов работы приведен в Приложении Б.

Предложенная технология организации водоснабжения города с элементами автоматического управления энергоемким оборудованием позволяет обеспечить экономию электроэнергии до 20% и воды до 10%.

Предложенные технические решения могут быть внедрены не только на предприятиях водоснабжения. На основе созданной системы мониторинга и управления может быть развернута общегородская диспетчерская служба. Данная служба может охватывать различные области городского хозяйства: объекты водо-, тепло- и газоснабжения, технологические объекты коммунального хозяйства и инженерное оборудование жилого фонда, системы мониторинга окружающей среды, средства контроля состояния дорог и движения транспорта и т.д. Подобная система может быть использована для развертывания АСУ жизнеобеспечения города. При этом должно быть обеспечено выполнение следующих требований:

- системность, состоящая в рациональной декомпозиции системы, и предоставляющая возможность автономной разработки и внедрения составных частей системы в различных областях городского хозяйства на основе единой технической политики;
- открытость, состоящая в способности системы к расширению состава функций, увеличению числа источников информации и пользователей, а также каналов управления;
- унификация, состоящая в рациональном применении типовых и стандартизированных проектных решений, внутренних и внешних интерфейсов и протоколов, систем сбора и передачи данных и т.д., что позволит осуществить модульное построение компонентов и подсистем системы в целом;
- осуществление поэтапной модернизации компонентов и составляющих системы, обеспечивающих ее постоянную адаптацию к изменяющимся требованиям пользователей;

- семантическое единство, состоящее в осуществлении комплекса мер, призванных обеспечить формирование единого городского информационного пространства;

- переносимость элементов системы, состоящая в обеспечении возможности функционирования созданных компонентов системы в различных областях городского хозяйства.

Разработанная АСУ ТП водоснабжения города удовлетворяет приведенным выше требованиям, в связи с чем может быть взята за основу для развертывания на ее базе автоматизированной системы управления жизнеобеспечением города. Данные работы в настоящее время начаты СКТБ «Турбулентность» и затрагивают области экологического мониторинга поверхностных вод водоемов и сточных вод предприятий, контроль уровня грунтовых вод, контроля загрязнения атмосферного воздуха и т.д. [106,117]. Развертывание компонентов экологического мониторинга в г. Донецке предполагается осуществить на основе, созданной в КП «Донецкгорводоканал» АСУ ТП водоснабжения города.

Все результаты, полученные автором в данной диссертационной работе, нашли свое отражение в следующих публикациях [14,15,16,17,18,19,20,82,83,84, 85, 86,87,88,89,90,91].

4.3. Выводы по разделу

По результатам внедрения можно сделать следующие выводы:

- На основе практического внедрения показано, что на базе использования компонентов разработанной автоматизированной системы может быть развернута и адаптирована к конкретным условиям городская территориально-распределенная АСУ ТП водоснабжения любого уровня сложности. Технологическая апробация результатов работы на ряде городских предприятий водоснабжения ДНР позволяет сделать вывод о возможности создания единых АСУ ТП, которые имеют открытую архитектуру и обеспечивают системность внедрения технических решений.

- Разработанные в диссертационной работе методы, алгоритмы и аппаратно-программные средства внедрены на предприятиях водоснабжения КП «Донецкгорводоканал», КП «Харцызкгорводоканал». Предложенная технология организации водоснабжения города с элементами автоматического управления энергоемким оборудованием позволяет обеспечить экономию электроэнергии от 15 до 20% и воды от 6 до 10%. Эффективность внедрения распределенной информационно-управляющей системы режимами работы муниципальной водопроводной сети определена по результатам опытно-промышленной эксплуатации в КП «Донецкгорводоканал» в 2012г. В отчетном докладе о реализации пилотного проекта Всеукраинского конкурса проектов и программ по энергосбережению «Модернизация автоматизированной системы диспетчерского контроля и управления объектами водоснабжения путем отработки пилотных элементов гидравлического моделирования водораспределительным процессом с применением узлов регулирования давления на инженерных сетях г.Донецка» 2013г приведены следующие цифры:

- уменьшено количество аварийных ситуаций на 726 ед., экономический эффект составил 2032,800 тыс.грн.

- снижены потери воды на 1220364,72 м³, экономический эффект составил 6199,452 тыс.грн.

- снижено потребление электроэнергии на 2410657 кВт, экономический эффект составил 2546382 тыс.грн.

Общий экономический эффект составил 10778,634 тыс.грн.

Данная АСУ ТП может быть взята за основу для развертывания автоматизированной системы управления жизнеобеспечением города.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе дано теоретическое обоснование и приведено решение научно-практической задачи повышения эффективности и экономичности процесса водоснабжения городов, на основе создания АСУ, включающей информационно-аналитическую многоуровневую систему управления с множественным доступом.

По результатам диссертационной работы сформулированы следующие выводы.

1. Обосновано, что объединение средств мониторинга с базами данных технологической информации и инструментами интеллектуального анализа данных является перспективным путем развития информационно-аналитических систем, обеспечивающих поддержку принятия решений на предприятиях водоснабжения.

2. Обосновано, что напорные и энергетические характеристики объектов водоподачи при автоматическом управлении, обеспечивающем поддержание заданного давления на входе в распределительную сеть, представляют собой линейные зависимости относительно временных рядов давления на входе в объект водоподачи.

3. Сформулированы задачи оперативного управления по поддержанию эффективных технологических режимов, а также задачи распознавания внештатных режимов и аварийных ситуаций.

4. Разработаны модели и синтезированы алгоритмы управления водопроводными узлами и подкачивающими насосными станциями, позволяющие поддерживать эффективные технологические режимы работы оборудования, которые обеспечивают экономию электроэнергии и воды.

5. Предложены алгоритмы распознавания внештатных технологических режимов и защиты от возникновения аварийных ситуаций при эксплуатации насосного оборудования водопроводных сетей.

6. Предложена методология повышения эффективности работы городских систем водоснабжения, а также распознавание внештатных режимов и аварийных ситуаций, возникающих при работе оборудования.

Разработанная информационная технология реализована в многоуровневой АСУ ТП водоснабжения города, имеющей множественные элементы технологического мониторинга и автоматического регулирования. Методы, алгоритмы и аппаратно-программные средства внедрены на предприятиях водоснабжения КП «Донецкгорводоканал» и КП «Харцызкгорводоканал».

Данная АСУ ТП может быть взята за основу для развертывания автоматизированной системы управления жизнеобеспечением города.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

SCADA – Supervisory Control And Data Acquisition (Система диспетчерского управления и сбора данных);

БД – база данных;

ГВС – городские водораспределительные системы;

ИС – информационная система;

КИС – корпоративная информационная система;

ГИС – географическая информационная система;

ДБН – Державні будівельні норми України;

ОС – окружающая среда;

ВУ – водопроводный узел;

ПНС – подкачивающая насосная станция;

КНС – канализационная насосная станция;

ИБП – источник бесперебойного питания;

УСО – устройство связи с объектом

ОРС-сервер – (OLE for Process Control) программный комплекс, предназначенный для управления объектами автоматизации и технологическими процессами;

ЦДП – центральный диспетчерский пункт;

ДД – датчик давления;

АПЧВН – автоматический преобразователь частоты;

ССПИ – система сбора и передачи информации;

АСУ ТП – автоматизированная система управления технологическими процессами;

АС – автоматизированная система;

ИБП – источник бесперебойного питания;

АРПСС – метод авторегрессии и проинтегрированного скользящего среднего.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматизация водоснабжения городов [Электронный ресурс] / мат. сайта комп. ООО Ролсиб, 2010. – Систем. требования: Pentium-500; 128 Мб RAM; Windows 98/2000/NT/XP; MSIE 6.0. – Название с тит. экрана. – Режим доступа: <http://privod.tomsk.ru/gorod-vodosnabzhenie>
2. Автоматизация водоснабжения, диспетчеризация КНС [Электронный ресурс] / мат. сайта Телепозиционный проект, 2007. – Систем. требования: Pentium-500; 128 Мб RAM; Windows 98/2000/NT/XP; MSIE 6.0. – Название с тит. экрана. – Режим доступа: <http://www.tpproject.ru/solution/water/>
3. Автоматизированная система управления насосными станциями г. Гагарин [Электронный ресурс] / мат. сайта компании Матис-М: Системы, Водоснабжение, 2005. – Систем. требования: Pentium-500; 128 Мб RAM; Windows 98/2000/NT/XP; MSIE 6.0. – Название с тит. экрана. – Режим доступа: <http://www.matis-m.ru/>
4. Автоматизированные системы контроля и управления [Электронный ресурс] / мат. сайта ОАО Уралмонтажавтоматика, 2006. – Систем. требования: Pentium-500; 128 Мб RAM; Windows 98/2000/NT/XP; MSIE 6.0. – Название с тит. экрана. – Режим доступа: <http://www.oaourma.ru/>
5. Автоматизовані системи. Терміни та визначення. – ДСТУ 2226-93. – [Чинний від 09.09.93]. – К. : Держспоживстандарт України, 2006. – 181 С. – (Національні стандарти України).
6. Айвазян, С.А. Прикладная статистика: Исследование зависимостей [Текст] / С.А. Айвазян, И.С. Енюков, Л.Д. Мешалкин. – М.: Финансы и статистика, 1985. – С. 487.
7. Айвазян, С.А. Прикладная статистика: Основы моделирования и первичная обработка данных [Текст] / С.А. Айвазян, И.С. Енюков, Л.Д. Мешалкин. – М.: Финансы и статистика, 1983. – С. 472.

8. Андерсен, Т. К. Статистический анализ временных рядов [Текст] / Т.К. Андерсен – пер. с англ. И. Г. Журбенко, В. П. Носко, под ред. Ю. К. Беляева. – М. : Мир, 1976. – С. 756.
9. АСКУЭ, системы диспетчерского контроля управления, системы телеметрии телемеханики [Электронный ресурс] / мат. сайта комп. ДЕП, 2002-2006. – Систем. требования: Pentium-500; 128 Мб RAM; Windows 98/2000/NT/XP; MSIE 6.0. – Название с тит. экрана. – Режим доступа: <http://www.dep.ru>
10. АСУТП Водоснабжение [Электронный ресурс] / мат. сайта комп. ENSYS Technologies, 2004. – Систем. требования: Pentium-500; 128 Мб RAM; Windows 98/2000/NT/XP; MSIE 6.0. – Название с тит. экрана. – Режим доступа: <http://www.ensyst.ru/services/9.php>
11. Балакирев, В.И Экспериментальное определение динамических характеристик промышленных объектов управления [Текст] / В.И. Балакирев, Е. М. Дудников, А.И. Цирлин. – М.: Энергия, 1967. – 232 С.
12. Барсегян, А.А. Методы и модели анализа данных: OLAP и Data Mining [Текст] / А.А. Барсегян., М.С. Куприянов, В.В Степаненко, И.И. Холод – СПб. : БХВ-Петербург, 2004. – С. 336.
13. Барсегян, А.А. Технологии анализа данных. Data Mining, Visual Mining, Text Mining, OLAP [Текст] / А.А. Барсегян, М.С. Куприянов, В.В. Степаненко, И.И. Холод – СПб.: БХВ-Петербург, 2007. – С. 436.
14. Беспалова, С.В. Анализ воздействия сточных вод горнодобывающей промышленности на состояние водных объектов / С.В. Беспалова, С.М. Романчук, С.В. Чуфицкий.// Донецкие чтения 2018. Образование, наука, инновации, культура и вызовы современности. Материалы III Международной научной конференции. – Том1. Физико-математические, технические науки и экология/ под общей редакцией С.В. Беспаловой. – Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2018. - С. 142-144.
15. Беспалова, С.В. Биомониторинг поверхностных вод в условиях антропогенной нагрузки на примере реки Кальмиус / С.В. Беспалова, С. М.

Романчук, С.В. Чуфицкий, А.С. Кривякин // Вестник Донецкого национального университета. Серия А: Естественные науки. - 2018. - № 3-4. - С. 137-145.

16. Беспалова, С.В. Концепция распределенного автоматизированного биомониторинга для Донбасса/ С.В. Беспалова, С. М. Романчук, С.В. Чуфицкий, Е.С. Сергеева// Донецкие чтения 2016. Образование, наука и вызовы современности. Материалы I Международной научной конференции. – Том1. Физико-математические, технические науки и экология/под общей редакцией С.В. Беспаловой. – Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2016. - С. 244-247.

17. Беспалова, С.В. Моделирование оптических параметров источников возбуждения импульсно - модулированного флуориметра / С.В. Беспалова, С.М. Романчук, Б.А. Готин, В.В. Перебейнос, О.Н. Саакян // Вестник Донецкого национального университета. Серия А: Естественные науки. - 2018. - № 1. - С. 69-75.

18. Беспалова, С.В. Построение предсказательных моделей параметров давления воды в водораспределительных сетях с помощью методов машинного обучения / С.В. Беспалова, С.М. Романчук, Т.В. Ермоленко, В.И. Бондаренко // Проблемы искусственного интеллекта. - 2019. – №2 (13) - С. 24-38.

19. Беспалова, С.В. Построение регрессионных моделей режимов работы водораспределительных сетей с помощью методов регуляризации и анализа главных компонент / С.В. Беспалова, С.М. Романчук, Т.В. Ермоленко, В.И. Бондаренко // Информатика и кибернетика. – Донецк, ДонНТУ, 2019. – №2 (16) - С. 35-47.

20. Беспалова, С.В. Флуориметрия хлорофилла фитопланктона и другие методы в мониторинге водных объектов Донбасса. (тезисы) / С.В. Беспалова, С.В. Чуфицкий, С.М. Романчук // в книге: Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды. Основные результаты и пути развития. Тезисы докладов Всероссийской научной конференции. ФГБУ «Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН». - 2017. - С. 355-356.

21. Бокс, Дж. Анализ временных рядов: прогноз и управление [Текст] / Дж. Бокс, Г. Дженкинс; пер. с англ. А. Л. Левшина, под ред. В. Ф. Писаренко. – М. : Мир, 1974. – С. 406 – (в 2-х томах, том 1).

22. Болонов, Н.И. Автоматизированная установка для поверки счетчиков воды [Текст] / Н.И. Болонов, С.М. Романчук, О.Н. Саакян, А.С. Ильенко // Матеріали міждун. науч.-техн. конф. «Метрологія і вимірювальна техніка». – Харьков, 2010. - С. 110 – 113.

23. Боровиков, В. П. Прогнозирование в системе Statistica в среде Windows. Основы теории и интенсивная практика на компьютере [Текст] : учеб. пособ. / В. П. Боровиков, Г. И. Ивченко – М. : Финансы и статистика, 1999. – С. 384 – ISBN 5-279-01980-1.

24. Внедрение опытной системы управления качеством энерго- и водоснабжения [Электронный ресурс] / мат. сайта Awwa Research Foundation, 2010. – Систем. требования: Pentium-500; 128 Мб RAM; Windows 98/2000/NT/XP; MSIE 6.0. – Название с тит. экрана. – Режим доступа: <http://www.waterresearchfoundation.org>

25. Вода питна. Гігієнічні вимоги до якості води централізованого господарсько-питного водопостачання. – ДСТУ Z0452-10. – [Чинний від 23.12.96]. – К. : Держспоживстандарт України, 2006. – С. 181 – (Національні стандарти України).

26. Водоснабжение и водоотведение. Промышленная автоматизация предприятий [Электронный ресурс] / мат. сайта комп. ЗАО Синетик, 2009-2010. – Систем. требования: Pentium-500; 128 Мб RAM; Windows 98/2000/NT/XP; MSIE 6.0. – Название с тит. экрана. – Режим доступа: http://sinetic.ru/ru/projects/index.php?SECTION_ID=276

27. Возможности эффективного использования энергии и воды в муниципальных водохозяйственных системах [Текст] / Alliance to Save Energy, под общ. ред. Д. Е. Немцова. – Washington, 2002. – С. 144.

28. Глобальные и региональные изменения климата и их природные и социально-экономические последствия [Текст] / Отв. Ред. В.М. Котляков. – М.: ГЕОС, 2000. – С. 387.

29. Гмурман, В.Е. Теория вероятности и математическая статистика [Текст] / В.Е. Гмурман. – М.: Высшая школа, 1998. – С. 479.

30. Гончаров, М. Ю. Метод проекции градиента [Электронный ресурс] / М.Ю. Гончаров // 2007-2010. – Систем. требования: Pentium-500; 128 Мб RAM; Windows 98/2000/NT/XP; MSIE 6.0. – Название с тит. экрана. – Режим доступа:

<http://www.businessdataanalytics.ru/>

31. Группы продукции НТП Энергосберегающие Технологии [Электронный ресурс] / мат. сайта ООО НТП Энергосберегающие Технологии, 2009. – Систем. требования: Pentium-500; 128 Мб RAM; Windows 98/2000/NT/XP; MSIE 6.0. – Название с тит. экрана. – Режим доступа: http://5773.ua.all-biz.info/by_product.php

32. Датчики давления и температуры, плотномеры, датчики потока, калибраторы [Электронный ресурс] / мат. сайта комп. ООО Стелла, 2010. – Систем. требования: Pentium-500; 128 Мб RAM; Windows 98/2000/NT/XP; MSIE 6.0. – Название с тит. экрана. – Режим доступа: <http://www.ste.ru>

33. Джеймс Г., Введение в статистическое обучение с примерами на языке R. Пер. С.Э. Мастицкого / Г. Джеймс, Д. Уиттон, Т. Хастис, Р. Тибширани //: ДМК Пресс, 2016. – С. 450.

34. Диспетчеризация и системы ресурсов. АСКУЭ. Энергоучет. Решения. [Электронный ресурс] / мат. сайта компании ИнСАТ, 2002 – 2010. – Систем. требования: Pentium-500; 128 Мб RAM; Windows 98/2000/NT/XP; MSIE 6.0. – Название с тит. экрана. – Режим доступа: http://www.insat.ru/projects/Dispatching_/

35. Диспетчерские системы водоканала [Электронный ресурс] / мат. сайта ЗАО Автоматика РУС, 2003-2007. – Систем. требования: Pentium-500; 128 Мб RAM; Windows 98/2000/NT/XP; MSIE 6.0. – Название с тит. экрана. – Режим доступа: <http://www.avtomatikus.com/automation/water-supply.html.ru>

36. Довкілля Донеччини у 2008 році [Текст] : статистичний збірник / [відп. за випуск Мошура О.І.]. – Донецьк, 2009. – №06-18 / 181. – С. 177. – (Держкомстат України. Головне управління статистики у Донецькій області).
37. Доклад о состоянии окружающей природной среды города Донецка в 2006 – 2007 годах [Текст] : научное изд. / [под общ. ред. Донецкого гор. головы А. А. Лукьянченко]. – Донецк, 2008. – С. 112. – (Управление экологической безопасности Донецкого городского совета).
38. Доклад о развитии человека 2006. Что кроется за нехваткой воды: Власть, бедность и глобальный кризис водных ресурсов [Текст] : / ООН, 2006. – Пер. с англ. изд-во “Весь мир”, 2007 – М. : Изд. «Весь мир», 2007. – С.440.
39. Драймз, Ф. Распределенные лаги. Проблема выбора и оценивания модели [Текст] / Ф. Драймз – пер. с англ. В. Д. Конакова, Д. В. Певцова, под ред. и с предисл. Э. Б. Ершова. – М. : Финансы и статистика, 1982. – С. 383.
40. Дрейпер, Норман. Прикладной регрессионный анализ. Множественная регрессия. / Норман Дрейпер, Гарри Смит – М.: «Диалектика», 2007, 3-е изд. – С. 912. – ISBN 0-471-17082-8.
41. Дюк, В.А. Data Mining – интеллектуальный анализ данных [Текст] / В.А. Дюк – СПб.: Питер, 2001. – С. 368.
42. Единая автоматизированная система диспетчерского контроля и управления городским хозяйством на базе Московской волоконно-оптической сети [Электронный ресурс] / Росаткевич Г. К., Краснобаев В. В., Scada Entek, 1998-2010. – Систем. требования: Pentium-500; 128 Мб RAM; Windows 98/2000/NT/XP; MSIE 6.0. – Название с тит. экрана. – Режим доступа:
<http://www.entels.ru/project/>
43. Емцев, Б.Т. Техническая гидромеханика [Текст] / Б.Т. Емцев – М.: Высш. шк., 1987. – С. 460.
44. Захист інформації. Технічний захист інформації. Терміни та визначення. – ДСТУ 3396.2-97. – [Чинний від 01.01.98]. – К. : Держстандарт України, 2001. – С. 15. – (Національні стандарти України).

45. Земля тревоги нашей. По материалам Докладов о состоянии окружающей природной среды в Донецкой области в 2007 - 2008 годах [Текст] / [под ред. С. В. Третьякова, Г. В. Аверина]. – Донецк, 2009. – С.124.

46. Иванцов, А. В. ГИС-технологии в управлении системами водоснабжения и водоотведения г. Уфа [Электронный ресурс] / А.В. Иванцов, Е.Н. Овсянникова // мат. сайта Геоинформационный портал ГИС-Ассоциации, 2002-2010. – Систем. требования: Pentium-500; 128 Мб RAM; Windows 98/2000/NT/XP; MSIE 6.0. – Название с тит. экрана. – Режим доступа: <http://www.gisa.ru>

47. Изменение климата, 2007: Физическая научная основа [Текст] / Материал рабочей группы I к Четвертому докладу Межправительственной группы экспертов по изменению климата об оценках [Соломон, С.Д. Чин, М. Мэннинг, Чен Женлинь, М. Маркис, К.Б. Аверит, М. Тигнор и Х.Л. Миллер (ред.)]. – М.:МГЭИК, 2007. – С. 162.

48. Инженерно-технические работы и управление системой водоснабжения [Электронный ресурс] / мат. сайта Water Info Center, 2010. – Систем. требования: Pentium-500; 128 Мб RAM; Windows 98/2000/NT/XP; MSIE 6.0. – Название с тит. экрана. – Режим доступа: <http://www.waterinfocenter.com>

49. Информационная технология. Виды испытаний автоматизированных систем. – ГОСТ 34.603-92. – [Дата ввода в эксп. 01.01.93]. – М. : ИПК изд-во стандартов, 2009. – С. 117-122. – (Государственные стандарты СССР).

50. ИТ. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Стадии создания. – ГОСТ 34.601-90. – [Дата ввода в эксплуатацию 01.01.92]. – М. : ИПК Изд-во стандартов, 2004. – С. 100 – 105. (Государственные стандарты СССР).

51. ИТ. Комплекс стандартов и руководящих документов на автоматизированные системы. Методические указания. Общие положения. –РД 50-682-89. – [Дата ввода в эксп. 01.01.90]. – М. : ИПК изд-во стандартов, 2000. – С. 181. – (Государственные стандарты СССР).

52. ИТ. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Методические указания. Основные положения. – РД 50-680-88. – [Дата ввода в эксп. 01.01.90]. – М. : Гос. комитет СССР по стандартам, 1989. – С. 10. – (Государственные стандарты СССР).

53. ИТ. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Методические указания. Требования к содержанию документов. – РД 50-34.698-90. – [Дата ввода в эксп. 01.01.92]. – М. : ИПК изд-во стандартов, 2000. – С. 55. – (Государственные стандарты СССР).

54. ИТ. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Техническое задание на создание автоматизированной системы. – ГОСТ 34.602-89. – [Дата ввода в эксп. 01.01.90]. – М. : ИПК Изд-во стандартов, 2004. – С. 11. – (Государственные стандарты СССР).

55. Кантор, Л. И. Информационные технологии при эксплуатации системы подачи и распределения воды [Текст] / Л.И. Кантор, И.П. Гилев, Д.Б. Скочило // Водоснабжение и санитарная техника. – [ред. Кантор Л.И.]. – М. : ООО «Издательство ВСТ». – №3, 2008 – С. 15-18.

56. Кацко, И. А. Практикум по анализу данных на компьютере: Учебно-практическое пособие / И.А. Кацко, Н.Б. Паклин; Под ред. проф. Г.В. Гореловой. – Краснодар: КубГАУ, 2007. – С. 220.

57. Кендэл, М. Временные ряды [Текст] / М. Кендэл; пер. с англ. и предисл. Ю. П. Лукашина. – М. : Финансы и статистика, 1981. – С. 199. – (Б-чка иностр. книг для экономистов и статистиков).

58. Комплексная система управления качеством энерго- и водоснабжения [Электронный ресурс] / мат. сайта Water Research Foundation, 2002-2010. – Систем. требования: Pentium-500; 128 Мб RAM; Windows 98/2000/NT/XP; MSIE 6.0. – Название с тит. экрана. – Режим доступа: [http:// www.awwarf.com/](http://www.awwarf.com/)

59. Комплекс ПО «Irrisoft» [Электронный ресурс] / мат. сайта Кассельского университета, 2010. – Систем. требования: Pentium-500; 128 Мб RAM; Windows 98/2000/NT/XP; MSIE 6.0. – Название с тит. экрана. – Режим доступа:

[http:// www.wizuni-kassel.de/kww/irrisoft/pipe/pipe_i.html](http://www.wizuni-kassel.de/kww/irrisoft/pipe/pipe_i.html)

60. Константинов, Н.М. Гидравлика, гидрология и гидрометрия [Текст] / Н.М. Константинов, Н.А. Петров, Л.И. Высоцкий – [В 2 ч.]. – М.: Высш. шк., 1987. – Ч. I. – 304 С; Ч. II. – С. 431.
61. Константинов, Н. М. Примеры гидравлических расчетов [Текст] / Н.М. Константинов, Н.А. Петров, В.А. Александров и др. – [3-е изд.]. – М: Транспорт, 1987. – С. 440.
62. Константинов, Ю. М. Гидравлика [Текст] / Ю.М. Константинов Ю. – К: Вища школа, 1988. – С. 398.
63. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа [Текст] : учеб. для вузов / Л. Г. Лойцянский. – [Изд. 5-е, перераб. и доп.]. – М. : Наука, 1978. – С. 736.
64. Лю, Б. Теория и практика неопределенного программирования [Текст] / Б. Лю – Пер. с англ. БИНОМ, 2005. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005. – С. 416. – ISBN 5-94774-241-1.
65. Масленников, В.С. Создание автоматизированной диспетчерского системы управления водопроводной станцией [Текст] / В.С. Масленников // Системотехника, телемеханика и автоматизация. – Системная интеграция, коммунальное хозяйство, №1, 2002. – С. 20 – 25.
66. Мастицкий, С.Э. Статистический анализ и визуализация данных с помощью R. М. / С.Э. Мастицкий, В.К Шитиков – ДМК Пресс, 2015. – С. 496.
67. Мониторинг и средства контроля работы насосных систем [Электронный ресурс] / мат. сайта комп. ОИТ, 2010. – Систем. требования: Pentium-500; 128 Мб RAM; Windows 98/2000/NT/XP; MSIE 6.0. – Название с тит. экрана. – Режим доступа: <http://www.oit.doe.gov/bestpractices>
68. Мусаев, А.А. Алгоритмы аналитического управления производственными процессами [Текст] / А.А. Мусаев // Автоматизация в промышленности. – [ред. Кантор Л.И.]. – №1, 2004, С. 30-35.
69. Определение эффективности водопроводно-канализационного хозяйства по нормативным показателям [Электронный ресурс] / мат. сайта Хельсинского технологического университета, 2010. – Систем. требования:

Pentium-500; 128 Мб RAM; Windows 98/2000/NT/XP; MSIE 6.0. – Название с тит. экрана. – Режим доступа: [http:// www.water.hut.fi/BUBI](http://www.water.hut.fi/BUBI)

70. Паклин, Н.Б. Бизнес-аналитика: от данных к знаниям [Текст] / Н.Б. Паклин, В.И. Орешков – СПб.: Питер, 2009. – С. 624.

71. Патрашев А. Н. Прикладная гидромеханика [Текст] / А.Н. Патрашев, Л.А. Кивако, С.И. Гожий – М. : Воениздат, 1970. – С. 688.

72. Повышение эффективности управления качеством энергоснабжения водохозяйственных систем [Электронный ресурс] / мат. сайта Awwa Research Foundation, 2008. – Систем. требования: Pentium-500; 128 Мб RAM; Windows 98/2000/NT/XP; MSIE 6.0. – Название с тит. экрана. – Режим доступа:

[http:// www.awwarf.com](http://www.awwarf.com)

73. Повх, И. Л. Техническая гидромеханика [Текст] / И.Л. Повх – [2 изд. перераб. и исправл.]. – М. : Машиностроение, 1976. – С. 504.

74. Пособие по проектированию автоматизации и диспетчеризации систем водоснабжения [Текст] / доп. к СНиП 2.04.02-84. – [утв. прик. Союзводоканал-НИИпроекта от 5.03.85]. – М. : Союзводоканал-НИИпроект, 1985. – С. 42.

75. Правила технічної експлуатації систем водопостачання та каналізації населених пунктів України [Текст] : зареєстр. МЮ України від 05 липня 1995 р. №231/767.

76. Про загальнодержавну програму «Питна вода України» на 2006 – 2020 роки [Текст] : постанова ВР України від 03 березня 2005 р. №2455-IV // Офіційний вісник України. – №13. – 2005. – С. 655.

77. Проектирование, строительство и реконструкция систем и сооружений для водоснабжения и водоотведения. Очистные сооружения. [Электронный ресурс] / мат. сайта комп. Гидроаудит. – Систем. требования: Pentium-500; 128 Мб RAM; Windows 98/2000/NT/XP; MSIE 6.0. – Название с тит. экрана. – Режим доступа: <http://www.hydroaudit.ru/asu>

78. Промышленная автоматизация, АСУТП [Электронный ресурс] / мат. сайта НПФ Круг, 2002-2010. – Систем. требования: Pentium-500; 128 Мб RAM; Windows 98/2000/NT/XP; MSIE 6.0. – Название с тит. экрана. – Режим доступа:

<http://www.krug2000.ru>

79. Про оснащення житлового фонду засобами обліку та регулювання споживання води і теплової енергії [Текст] : постанова КМ України від 11 червня 2008 р. №838-р.

80. Про питну воду і питне водопостачання [Текст] : постанова ВР України від 10 січня 2002 р. №2918-III // Офіційний вісник України. – №6. – 2002. – С. 223.

81. Профос, П. М. Регулирование паросиловых установок управления [Текст] / П. М. Профос. – М.: Энергия, 1967. – С. 368.

82. Романчук, С.М. Алгоритмы управления технологическими режимами водоснабжения городов/ С.М. Романчук // Наукові праці ДонНТУ. Серія «Проблеми екології» – Донецьк, 2013. – №1. – С. 98-108.

83. Романчук, С.М. Закономерности и статистические модели режимов работы городских водораспределительных сетей/ С.М. Романчук // Наукові праці ДонНТУ - Серія «Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка» – Донецьк, 2012. – №16(204). – С. 208-214.

84. Романчук, С.М. Интеллектуальный анализ данных в АСУ ТП водоснабжения городов / С.М. Романчук, О.Н. Саакян, В.В. Перебейнос // Донецкие чтения 2016. Образование, наука и вызовы современности. Материалы I Международной научной конференции. – Том1. Физико-математические, технические науки и экология/ под общей редакцией С.В. Беспаловой – Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2016. –С. 360-361.

85. Романчук, С.М. Информационное обеспечение интегрированной системы управления городским хозяйством [Текст] / С.М. Романчук, О.Н. Саакян, А.С. Ильенко, А.С. Кривякин // Матеріали наук. конф. проф.-виклад. складу Донецького університету. – Т.1: Природничі науки/ред. Шевченко В.П., Беспалова С.В. – Донецьк: Цифрова типографія, 2009. - С. 204 – 209.

86. Романчук, С.М. Мониторинг и анализ данных в процессе управления водоснабжением города Донецка / С.М. Романчук // Наук. Праці ДонНТУ. Системний аналіз та інформаційні технології у науках про природу та суспільство / ред. Башков Е.А. – 2010. - № 1. - С. 133-143.

87. Романчук, С.М. Направления развития городских АСУ ТП водоснабжения и водоотведения (статья) / С.М. Романчук // Наукові праці ДонНТУ. Серія «Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка» – Донецьк, 2014. – №1(19). – С. 131-138.

88. Романчук, С.М. Применение информационно-аналитических систем в управлении водоснабжением г. Донецка (тезисы) / С.М. Романчук, О.Н. Саакян, А.С. Кривякин // XII Международная научно-техническая конференция АС ПГП «Промышленная гидравлика и пневматика». - Донецк, 11-13 октября 2011г.

89. Романчук, С.М. Разработка двухосевого электромагнитного измерителя скорости течения воды. / С.М. Романчук, Б.А. Готин, С.В. Подгайнов // Донецкие чтения 2018. Образование, наука, инновации, культура и вызовы современности. Материалы III Международной научной конференции. – Том 1. Физико-математические, технические науки и экология / под общей редакцией С.В. Беспаловой. – Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2018. - С. 40-41.

90. Романчук, С.М. Разработка опытного образца аппаратно-программного комплекса экологического мониторинга г. Донецка / С.М. Романчук // Труды Международного Научно-практического семинара «Гидродинамика и экология» / ред. Ступин А.Б. – Донецк: ДонНУ, 2009. - С. 150 – 156.

91. Романчук, С.М. Сравнительный анализ погрешностей измерения различными методами содержания растворенного кислорода в сточных водах (тезисы) / С.М. Романчук, Д.В. Пилипенко, А.С. Ильенко, А.С. Кривякин // XII Международная научно-техническая конференция АС ПГП «Промышленная гидравлика и пневматика». - Донецк, 11-13 октября 2011г.

92. Руководство по энергетическому аудиту для систем водоснабжения и канализации [Электронный ресурс] / мат. Electric Power Research Institute, 2001-2010. – Систем. требования: Pentium-500; 128 Мб RAM; Windows 98/2000/NT/XP; MSIE 6.0. – Название с тит. экрана. – Режим доступа: <http://www.epri.com>

93. Рульнов, А. Н. Автоматизация систем водоснабжения и водоотведения [Текст] / А. Н. Рульнов, К. И. Евстафьев. – М. : Изд. дом Инфра-М, 2007. – С. 205.

94. Серов, Е. Н. Динамика парогенераторов [Текст] / Е. Н. Серов, Б.И. Корольков. – М.: Энергия, 1972. –С. 417.

95. Система автоматизации и диспетчеризации объектов Водоканала [Электронный ресурс] / мат. сайта ЗАО Технолинк, 1999-2010. – Систем. требования: Pentium-500; 128 Мб RAM; Windows 98/2000/NT/XP; MSIE 6.0. – Название с тит. экрана. – Режим доступа:

<http://www.technolink.spb.ru/index.php?pid=360>

96. Система компьютерного моделирования водопроводных сетей [Электронный ресурс] / мат. сайта НКФ Волга, 2010. – Систем. требования: Pentium-500; 128 Мб RAM; Windows 98/2000/NT/XP; MSIE 6.0. – Название с тит. экрана. – Режим доступа: <http://www.volgaltd.ru/software/>

97. Системы диспетчеризации и управления [Электрон. ресурс] / мат. сайта комп. Атлас, 2010. – Систем. требования: Pentium-500; 128 Мб RAM; Windows 98/2000/NT/XP; MSIE 6.0. – Название с тит. экрана. – Режим доступа:

<http://www.atlas.ua>

98. Системы диспетчерского управления и сбора данных (SCADA) систем муниципального водоснабжения [Электронный ресурс] / мат. сайта EERE, 2010. – Систем. требования: Pentium-500; 128 Мб RAM; Windows 98/2000/NT/XP; MSIE 6.0. – Название с тит. экрана. – Режим доступа:

http://www.eren.doe.gov/cities_countries/watersy.html

<http://www.eere.energy.gov/>

99. Системи оброблення інформації. Автоматизована установа. Терміни та визначення. – ДСТУ 2227-93. – [Чинний від 01.07.94]. – К. : Держспоживстандарт України, 2006. – С. 181. – (Національні стандарти України).

100. Системи управління якістю. Вимоги. – ДСТУ ISO 9001-2001. – [Чинний від 27.07.01]. – К. : Держстанд України, 2001. – С. 25. – (Наці. стандарти України).

101. Софт портал: автоматизация водоканалов [Электронный ресурс] / мат. сайта комп. Софт портал, 2003-2010. – Систем. требования: Pentium-500; 128 Мб RAM; Windows 98/2000/NT/XP; MSIE 6.0. – Название с тит. экрана. – Режим доступа: <http://www.soft-portal.ru/autovoda/>

102. Стадников, В. В. Геоинформационная система «Паспортизация сетей водопровода» [Текст] / В.В. Стадников – Сер. География, т. 18(57), № 2, 2005. – С. 93 – 96. – (Ученые записки ТНУ им. В. И. Вернадского).

103. Ступин, А.Б. Автоматизированная система мониторинга и управления водоснабжением города Донецка [Текст] / А.Б. Ступин, С.М. Романчук // Вісник Донецького університету. Сер. А: Природничі науки/ ред. Шевченко В.П. –2009. - №2. - С. 333-343.

104. Требования к содержанию документов по программному обеспечению. – ГОСТ 24.207-80. – [Дата ввода в эксп. 01.01.81]. – М. : Гос. комитет СССР по стандартам, 1982. – 4 С. – (Государственные стандарты СССР).

105. Флах, П. Машинное обучение. Наука и искусство построения алгоритмов, которые извлекают знания из данных. / П. Флах – Пер. с англ. – М.: ДМК Пресс, 2015. – С. 400.

106. Хромов, С. П. Метеорология и климатология [Текст] / С.П. Хромов, М. А. Петросянц – М.: Изд МГУ, 2001. – С. 528. – ISBN 5-211-04499-1.

107. Чермак, И. Динамика регулируемых систем в теплоэнергетике и химии [Текст] / И. Чермак, В. Петерка, И. Заварка. – М.: Мир, 1972. – С. 623.

108. Чумак, И.С. Динамические режимы работы холодильных установок и аппаратов [Текст] / И. С. Чумак, А. А. Коханский. – М.: Машиностроение, 1978. – С. 191.

109. Шкундина, Ф. Б. Интеллектуальный анализ данных мониторинга биологических очистных сооружений [Текст] / Ф. Б. Шкундина, В. А. Книсс, Р. А. Шкундина. Экология и промышленность России (ЭЖиП): обществ. науч.-техн. журн. / Моск. ин-т стали и сплавов (Технолог. ун-т), ЗАО "Калвис". – М. – 2006г., № 9. – С.35-37.

110. Эйкхофф, П. Основы идентификации систем управления [Текст] / П. Эйкхофф. – М.: Мир, 1975. – С. 683.

111. Экспертные и прогнозные системы с ИАД SAS Business Analytics Framework [Электронный ресурс] / мат. сайта комп. SAS, 2010. – Систем.

требования: Pentium-500; 128 Мб RAM; Windows 98/2000/NT/XP; MSIE 6.0. – Название с тит. экрана. – Режим доступа:

<http://www.sas.com/offices/europe/russia/software/index.html>

112. Шитиков, В.К. Рандомизация и бутстреп: статистический анализ в биологии и экологии с использованием R. / В.К. Шитиков, Г.С. Розенберг–Тольятти: Кассандра, 2014. – С. 314.

113. SCADA для водоснабжения [Электронный ресурс] / мат. перс. сайта Кирпичева К. Ю., 2006-2010. – Систем. требования: Pentium-500; 128 Мб RAM; Windows 98/2000/NT/XP; MSIE 6.0. – Название с тит. экрана. – Режим доступа:

<http://scadas.ru/opyit/scada-dlya-vodosnabzheniya.html>

www.wonderware.com/solutions/SCADA

114. Agrawal, R. Mining Association Rules Between Sets of Items in Large Databases [Text] / R Agrawal, T Imielinsky, A Swami – In Proc. ACM SIGMOD Intl. Conf. Management of Data. – Washington, DC, 1993. – P. 207–216.

115. Thumann, A. Учебник по энергетическому аудиту [Текст] / А. Thumann – [4 изд.]. – пер. с англ. – USA, Fairmont Press, 1995 – P. 444.

116. Alliance to Save Energy. Creating an Energy-Efficient World [Electronic resource] / source of comp. ASE, 2010. – Requirements: Pentium-500; 128 Мб RAM; Windows 98/2000/NT/XP; MSIE 6.0; Adobe Acrobat Reader 6.0. – Access mode:

<http://www.ase.org/>

117. Bepalova, S.V. Automated monitoring of ecological state of surface waters using phytoplanktonasbioindicator/ S.V. Bepalova, S.M. Romanchuk, N.M. Lyalyuk, D.N. Afanasyev, A.V. Vasilyev //Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона. - 2011. - № 1. - С. 9-24.

118. ClearScada. Control MicroSystems [Электронный ресурс] / мат. сайта комп. ПЛКСистемы, 2010. – Систем. требования: Pentium-500; 128 Мб RAM; Windows 98/2000/NT/XP; MSIE 6.0. – Название с тит. экрана. – Режим доступа:

<http://www.plcsystems.ru>

119. Simplicity PE [Электронный ресурс] / мат. сайта комп. GE Inteligent Platforms, 2010. – Систем. требования: Pentium-500; 128 Мб RAM; Windows 98/2000/NT/XP; MSIE 6.0. – Название с тит. экрана. – Режим доступа:

<http://www.gefanuautomation.com/ru/index.html>

120. Data Mining: Definition from Answers.com [Electronic resource] Source of Reference Answer, 2010. – Requirements: Pentium-500; 128 Мб RAM; Windows 98/2000/NT/XP; MSIE 6.0; Adobe Acrobat Reader 6.0. – Access mode:

<http://www.answers.com/topic/data-mining>

121. Data Mining: Overview [Electronic resource] / Source of comp. MIT, 2002-2010. – Requirements: Pentium-500; 128 Мб RAM; Windows 98/2000/NT/XP; MSIE 6.0; Adobe Acrobat Reader 6.0. – Access mode:

<http://ocw.mit.edu/NR/rdonlyres/Sloan-School-of-Management/15-062Data-MiningSpring2003/E738593F-0DF6-47B7-9171-A39839F160AE/0/Lecture1Slides.pdf>

122. Information technology. Vocabulary. – ISO/IEC 2328-1:1993. – (Международный стандарт в сфере IT).

123. Paolo Giudici. Applied Data Mining [Текст англ.] / Paolo Giudic – Изд. Wiley, 2003. – С. 379. – ISBN 0-470-84679-8.

124. Pumping System Assessment Tool [Electronic resource] / Source of site OIT Company, 2010. – Requirements: Pentium-500; 128 Мб RAM; Windows 98/2000/NT/XP; MSIE 6.0; Adobe Acrobat Reader 6.0. – Access mode:

<http://www.oit.doe.gov/bestpractices/>

125. Tan, P. N. Introduction to Data Mining [Text] / P.N. Tan, M. Steinbach, V Kumar – Addison-Wesley, 2005. – P. 769. – ISBN 0-321-32136-7.

126. Shekhar, S. Spatial Databases: A Tour, [Text] / S. Shekhar, S. Chawla – Prentice Hall, 2003. – ISBN 013-017480-7.

127. Wastewater Management: Conservation Pricing of Water and Wastewater [Electronic resource] / Doc. 832/D-98-001. – Source of USA EPA., 2010. – Requirements: Pentium-500; 128 Мб RAM; Windows 98/2000/NT/XP; MSIE 6.0; Adobe Acrobat Reader 6.0. – Access mode: <http://www.epa.gov/owm>

128. Waterwise Water Efficiency Clearinghouse [Electronic resource] / source of American Water Works Association, 2010. – Requirements: Pentium-500; 128 Mб RAM; Windows 98/2000/NT/XP; MSIE 6.0; Adobe Acrobat Reader 6.0. – Access mode: <http://www.waterwiser.org>

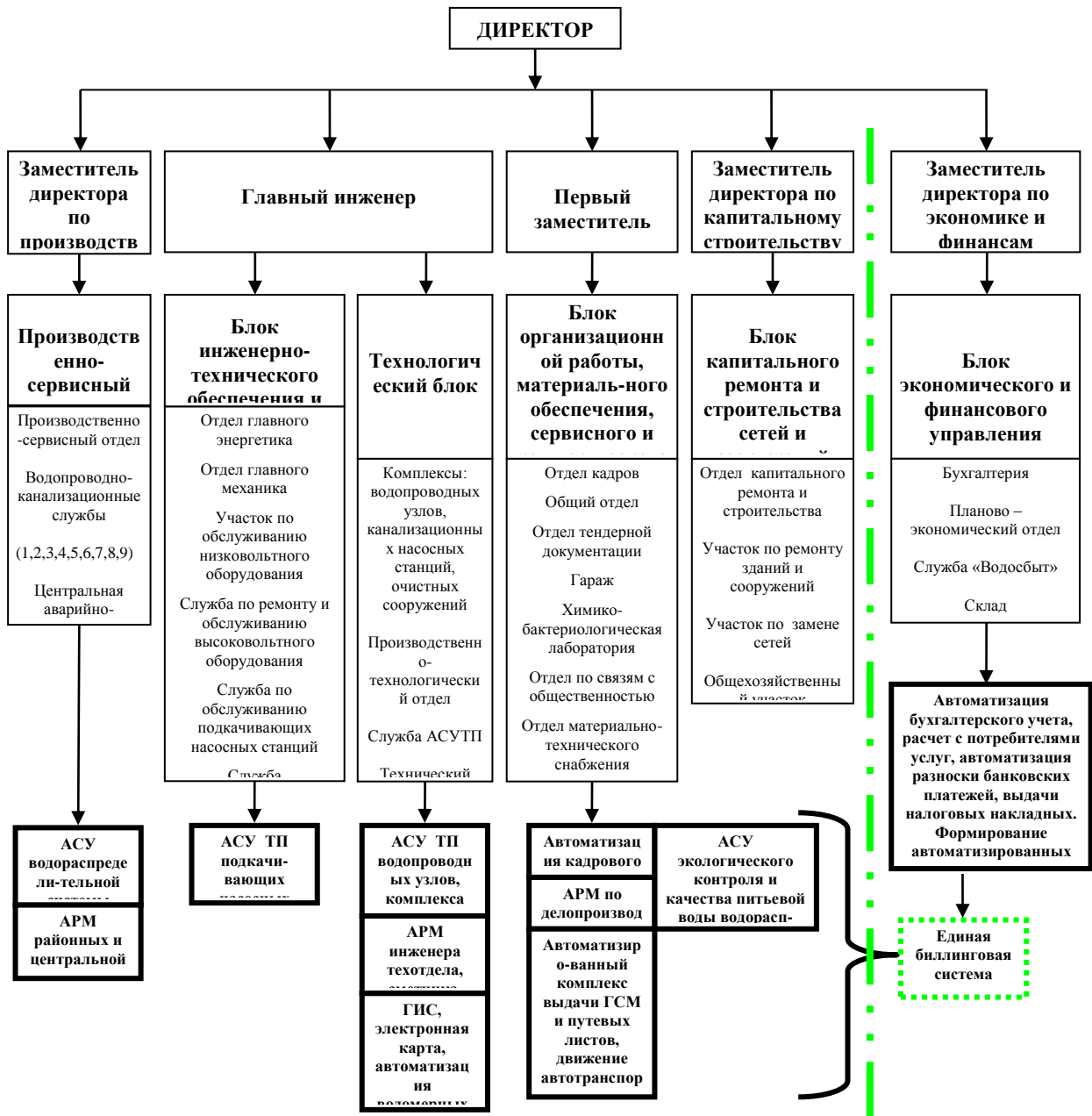
129. Water System Center [Electronic resource] / Source of site Exeter University, 2010. – Requirements: Pentium-500; 128 Mб RAM; Windows 98/2000/NT/XP; MSIE 6.0; Adobe Acrobat Reader 6.0. – Access mode: <http://www.ex.ac.uk/WaterSystems/>

130. WRCS Hidrology SoftWate and Hydralis Software Shop [Electronic resource] / Source of site AAWRE Company, 2010. – Requirements: Pentium-500; 128 Mб RAM; Windows 98/2000/NT/XP; MSIE 6.0; Adobe Acrobat Reader 6.0. – Access mode: <http://www.waterengr.com/>

131. WWE [Electronic resource] / source of site Waterwise, 2018. – Requirements: Pentium-500; 128 Mб RAM; Windows 98/2000/NT/XP; MSIE 6.0; Adobe Acrobat Reader 6.0. – Access mode: <https://waterwise.org.uk/>

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Структура корпоративной информационной системы КП «Донецкгорводоканал», обеспечивающей поддержку технологических процессов



ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Копии документов о внедрении результатов исследований

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ ПО
ВОПРОСАМ ЖКХ УКРАИНЫ
ХАРЦЫЗСКОЕ КОММУНАЛЬНОЕ
ПРЕДПРИЯТИЕ
"ГОРВОДОКАНАЛ"
г. Харцызск, ул. Красная, 7
14.10.2016 №1/24

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы
Романчука Сергея Михайловича
на тему: «Распределенная информационно-управляющая система
режимами работы муниципальной водопроводной сети»,
представленную на соискание ученой степени кандидата
технических наук по специальности 05.13.06 – Автоматизация и
управление технологическими процессами и производствами (по
отраслям) (технические науки)

Результаты диссертационных исследований Романчука С.М. были
приняты к использованию КП «Харцызскводоканал» при модернизации
системы управления и контроля технологическим процессом водоснабжения
г. Харцызска.

В частности:

1. Рекомендации к структуре разрабатываемой системы управления.
2. Алгоритм работы управляющей системы.
3. Автономный программно-аппаратный комплекс мониторинга технологических параметров.

Директор



С.М.М.

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Копия документа о внедрении результатов исследований в учебный процесс



**ДОНЕЦКАЯ НАРОДНАЯ РЕСПУБЛИКА
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

83001, г. Донецк-01, ул. Университетская, 24
тел.: приемная (062) 302-07-22, справочная служба (062) 302-06-00, факс: (062) 302-07-49
e-mail: rector@donnu.ru

08.10.2019 № 4124/01-27/25

на № _____ от _____ г.



Диссертационный совет
Д 01.024.04 при ГОУ ВПО
«Донецкий национальный
технический университет»
и ГОУ ВПО «Донецкий
национальный университет»

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы Романчука С.М. на тему «Распределенная информационно-управляющая система режимами работы муниципальной водопроводной сети», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям) (технические науки)

Одним из перспективных направлений при разработке прогнозных и экспертных систем для пространственно-распределенных объектов, является использование методов интеллектуального анализа данных.

Актуальность освоения данных методов определяется принадлежностью их к мультидисциплинарной области, развивающейся в рамках информатики на базе достижений прикладной статистики, методов распознавания образов и искусственного интеллекта, теории баз данных и современных достижений всей вычислительной науки.

Методики построения регрессионных моделей с использованием методов машинного обучения были внедрены в обучение учебной дисциплине «Машинное обучение» на кафедре компьютерных технологий физико-технического факультета ДонНУ, в частности:

- методика построения регрессионных моделей режимов работы водораспределительных сетей;
- методика построения предсказательных моделей систем управления режимами водоснабжения.

Проректор по научно-методической и учебной работе, доктор педагогических наук, профессор



Е.И.Скафа