

На правах рукописи



Бабинович Дарья Евгеньевна

**ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ НА ОБЪЕКТАХ
ТЕХНИЧЕСКОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ (НА ПРИМЕРЕ НАСОСНОЙ
СТАНЦИИ ТРЕТЬЕГО ПОДЪЕМА ООО «ТОМСКВОДОКАНАЛ»)**

Специальность 05.14.02- «Электрические станции и электроэнергетические
системы»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2016

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Кабышев Александр Васильевич

Официальные оппоненты: **Русина Анастасия Георгиевна**, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» (г.Новосибирск), профессор кафедры автоматизированных электроэнергетических систем.

Рикконен Сергей Владимирович, кандидат технического наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» (г. Томск), старший научный сотрудник НИИ прикладной математики и механики.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск

Защита диссертации состоится «15» марта 2017 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.10 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в научно- технической библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634034, г. Томск, ул. Белинского, 55 и на сайте: <http://portal.tpu.ru/council/2800/worklist>.

Автореферат разослан «02» февраля 2017 г.

И.о. Ученого секретаря
диссертационного совета



Курец В.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В соответствии с Энергетической стратегией РФ до 2030 года целевым вектором является максимально рациональное использование энергетических ресурсов на основе обеспечения заинтересованности их потребителей в энерго-сбережении. Такая заинтересованность для предприятий возникает вследствие ежегодного роста тарифов на энергоносители.

Также федеральный закон от 23.11.2009 №261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты РФ» регламентирует снижение потребляемых энергоресурсов до 2015 года на 15 % с дальнейшим поддержанием данного достигнутого показателя.

Экономическая эффективность объектов водоснабжения определяется режимами работы насосных агрегатов и вспомогательного оборудования насосных станций. Доля электрической энергии, которую потребляют электродвигатели насосных агрегатов на передачу воды потребителю, достигает 70-90%.

Основным из самых эффективных методов повышения энергоэффективности работы насосных агрегатов на сегодняшний день является внедрение частотного регулируемого привода (ЧРП). Данный метод оптимизации позволяет получить экономию электрической энергии и мощности до 40- 60%.

Применение ЧРП несомненно позволяет снизить уровень потребления электрической энергии, но в связи с тем, что на розничных рынках стоимость потребленной электрической энергии (ЭЭ) различается для каждого часа суток, то при регулировании электрической нагрузки учет данного фактора может снизить затраты на ее приобретение.

Таким образом, для ООО «Томскводоканал» решением вопроса повышения энергоэффективности может быть использована оптимизация работы оборудования за счет внедрения в структуру управления насосными агрегатами технической воды функции оптимизации и прогноза потребления ЭЭ на базе ЧРП.

Такое использование ЧРП в комплексе с прогнозным регулированием запасов технической воды в резервуарах может определить методику прогнозной оптимизации регулирования электрической нагрузки насосного агрегата.

Прогноз потребления и оптимизационная функция учитывают в таком случае цены на электроэнергию для каждого часа, а также стоимость сетевой мощности и мощности покупки, позволяя в часы минимума стоимости электрической энергии накапливать воду в резервуарах потребителя, а в часы максимума стоимости осуществлять ее расход без нарушения технологического процесса. Данный метод оправдан тем, что выполнение запаса электрической энергии достаточно трудоемкий и дорогостоящий процесс, а в состав технологической схемы потребителя включен резервуар технической воды.

В таком случае у предприятия появляется возможность помимо экономии электрической энергии за счет использования частотного привода полу-

чить также экономию в стоимостном выражении за счет регулирования и оптимизации технологического процесса и внедрения прогнозного аппарата. Отсутствие комплексного подхода к процедуре управления техническим процессом работы насосного оборудования с учетом цен на потребляемую ЭЭ определили выбор цели данной работы.

Степень разработанности темы исследования

Результаты исследования применения ЧРП на объектах водоснабжения и на других промышленных предприятиях изложены в работах отечественных авторов, таких как Б.С.Лезнова, А.В. Афанасьева, Д.Петрова, И.А.Сыромятникова, В.Б.Воздвиженского, Г.Б.Лазарева, Г.Б.Онищенко, Г.Г.Соколовского и др. В данных работах доказано получение экономии электрической энергии до 40%, и в некоторых случаях даже до 60% за счет применения ЧРП на производстве. Аналогичные результаты были достигнуты в работах зарубежных авторов.

На интернет - ресурсе информационно-внедренческого центра «City Com» автором А.Р.Ексаевым представлена информация о внедрении системы диспетчеризации на базе информационно-графической системы «AnWater» на ОАО «Мосводоканал». По представленной на сайте информации с помощью данной системы осуществляется регулирование электрической нагрузки в зависимости от прогнозирования потребления ЭЭ и наполненности резервуаров воды.

В представленной работе присутствует информация о достигнутой погрешности прогноза, однако алгоритм управления электрической нагрузкой станции и оценка экономической эффективности не приведены.

Следовательно, остается нерешенными ряд вопросов, связанных с внедрением прогнозной оптимизации, таких как разработка алгоритма прогнозно-оптимизационного регулирования электрической нагрузки насосной станции, выбор метода прогнозирования, наиболее адаптированного к графику электрической нагрузки насосной станции, проведение экономического обоснования эффективности использования такого способа регулирования электрической нагрузки.

Идея работы: прогнозная оптимизация электропотребления и снижение затрат на приобретение электрической энергии на объектах технического водоснабжения.

Цель и задачи работы. Целью диссертационной работы является разработка методики прогнозно-оптимизационного управления работой электрооборудования тракта технического водоснабжения.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести оценку ситуации на розничном рынке электрической энергии и выполнить прогнозирование потребления электрической энергии для объекта водоснабжения.
2. Создать алгоритм управления работой насосного агрегата технического водоснабжения при прогнозно-оптимизационном регулировании и разработать имитационную модель насосной станции.

3. Рассчитать уровень потребления ЭЭ и затраты на ее приобретение при прогнозно-оптимизационном регулировании работы насосного агрегата технического водоснабжения. Сравнить полученные результаты с другими способами регулирования электрической нагрузки. Оценить эффективность использования прогнозно-оптимизационного регулирования на экспериментальной установке.

Научная новизна работы:

1. Предложена методика ситуационного выбора метода прогнозирования потребления электрической энергии, позволяющая достигнуть высокой точности прогноза, снизив отклонения фактического потребления от планового значения.
2. Разработан алгоритм управления работой насосного агрегата технического водоснабжения при внедрении прогнозно-оптимизационного управления.
3. Разработана методика регулирования электрической нагрузки с использованием прогнозно-оптимизационного управления, результаты расчета экономической эффективности от использования данного способа регулирования в сопоставлении с другими способами регулирования.
4. Доказана эффективность применения прогнозно-оптимизационного регулирования электрической нагрузки на экспериментальной установке.

Теоретическая значимость работы: заключается в разработке методики прогнозно-оптимизационного регулирования электрической нагрузки для объекта технического водоснабжения.

Практическая значимость работы:

1. В соответствии с характерными особенностями графика электрической нагрузки насосной станции выбран метод прогнозирования, который позволяет получить наименьшую погрешность и минимальную суточную стоимость отклонения прогнозного потребления ЭЭ от фактического значения.
2. Разработан алгоритм прогнозно-оптимизационного управления, при котором в зависимости от прогноза потребления электрической энергии, запасов воды в резервуарах технической воды и значения стоимости ЭЭ и мощности на розничном рынке, осуществляется регулирование электрической нагрузки насосного агрегата. Таким подходом достигается снижение суммарных затрат на приобретение электрической энергии и мощности.

Практическая ценность подтверждается актом об использовании результатов научно-исследовательской работы на предприятии ООО «Томскводоканал».

Методология диссертационного исследования. Методологической и теоретической основой диссертационного исследования послужили результаты отечественных и зарубежных исследований в области прогнозирования потребления электрической энергии для промышленных предприятий, и ис-

следования в области применения частотно-регулируемого привода на объектах водоснабжения. При выполнении работы применялись методы компьютерного моделирования и математической статистики обработки результатов эксперимента.

Методы диссертационного исследования. В ходе исследования применялись методы математического моделирования, вейвлет-анализа, эконометрические методы, методы нейронных сетей с погружением в нейросетевой логический базис, методы авторегрессии проинтегрированного скользящего среднего, расчет параметров схем замещения основного энергетического оборудования, проведение эксперимента. Для обработки данных использованы программные продукты: MS Excel, Mathcad 14.0, Matlab 2013a, Statistica 6.0, TRACE MODE.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Методика ситуационного выбора метода прогнозирования потребления электрической энергии, позволяющая достигнуть высокой точности прогноза, снизив отклонения фактического потребления от планового значения.
2. Алгоритм управления работой насосного агрегата технического водоснабжения при внедрении прогнозно-оптимизационного управления.
3. Методика регулирования электрической нагрузки с использованием прогнозно-оптимизационного управления, результаты расчета экономической эффективности от внедрения данного способа регулирования в сопоставлении с другими способами регулирования.
4. Оценка эффективности применения прогнозно-оптимизационного регулирования электрической нагрузки на экспериментальной установке.

Степень достоверности и апробация результатов исследования:

Достоверность полученных результатов обеспечивается корректностью постановок рассматриваемых задач и методов их решения; надежно протестированными компьютерными программами; хорошим соответствием расчетных и экспериментальных данных. Экономическая оценка представлена в соответствии с действующими ценами на розничном рынке электрической энергии и мощности.

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях и семинарах: 11-ый Международный форум по стратегическим технологиям *IFOST-2016* (г. Новосибирск); научная-практическая конференция *Energy Quest 2014* (г. Екатеринбург); VI Международная научно-техническая конференция (г. Томск); V Всероссийская научная-техническая конференция «Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования» (г. Томск); Всероссийская молодежная конференция «Химическая физика и актуальные проблемы электроэнергетики» (г. Томск); Международная конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (г. Томск); XVII Всероссийская научно-техническая конференция «Энергетика: эффективность, надежность, безопасность» (г. Томск); научная-практическая конференция «Ло-

кальная энергетика: опыт, проблемы, перспективы развития» (г. Якутск); XII Всероссийской студенческой научно-технической семинар «Энергетика: экология, надежность, безопасность» (г. Томск); IV чтения Ш. Шокина материалы IV Международной научно-технической конференции (г. Павлодар); Всероссийская научная студенческая конференция молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (г. Новосибирск); XV Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Современная техника и технологии».

Внедрение результатов исследований. Результаты исследований переданы и используются на ООО «Томскводоканал».

Личный вклад автора Автор принимал непосредственное участие в планировании и проведении исследований данной диссертационной работы; обработке, анализе и обобщении полученных данных; написании статей, докладов.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликована 21 работа, в том числе одна статья в изданиях, входящих в базу Scopus; 6 статей в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России для соискателей ученых степеней.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения и приложения. Работа изложена на 140 листах, содержит 62 рисунка, 21 таблицу, 4 приложения и список использованных источников из 83 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, перечислены полученные в диссертации новые результаты, их теоретическая и научно-практическая ценность, приведены положения, выносимые на защиту, дана краткая характеристика разделов диссертации.

Первый раздел диссертационной работы посвящен вопросам эффективности регулирования нагрузки нагнетающего оборудования с использованием частотного регулируемого привода. Объектом исследования является нагнетающая установка низкого давления, представленная на рисунке 1. В качестве верхнего уровня управления частотного привода использована SCADA (*supervisory control and data acquisition*) TRACE MODE. Многооконный интерфейс системы позволил представить мнемосхему технологического процесса, представленной на рисунке 2, совместно с узлами контроля и управления.

По произведенной оценке результатов эксперимента экономия ЭЭ при использовании частотного регулирования нагрузки по сравнению с дросселированием составила 60%.

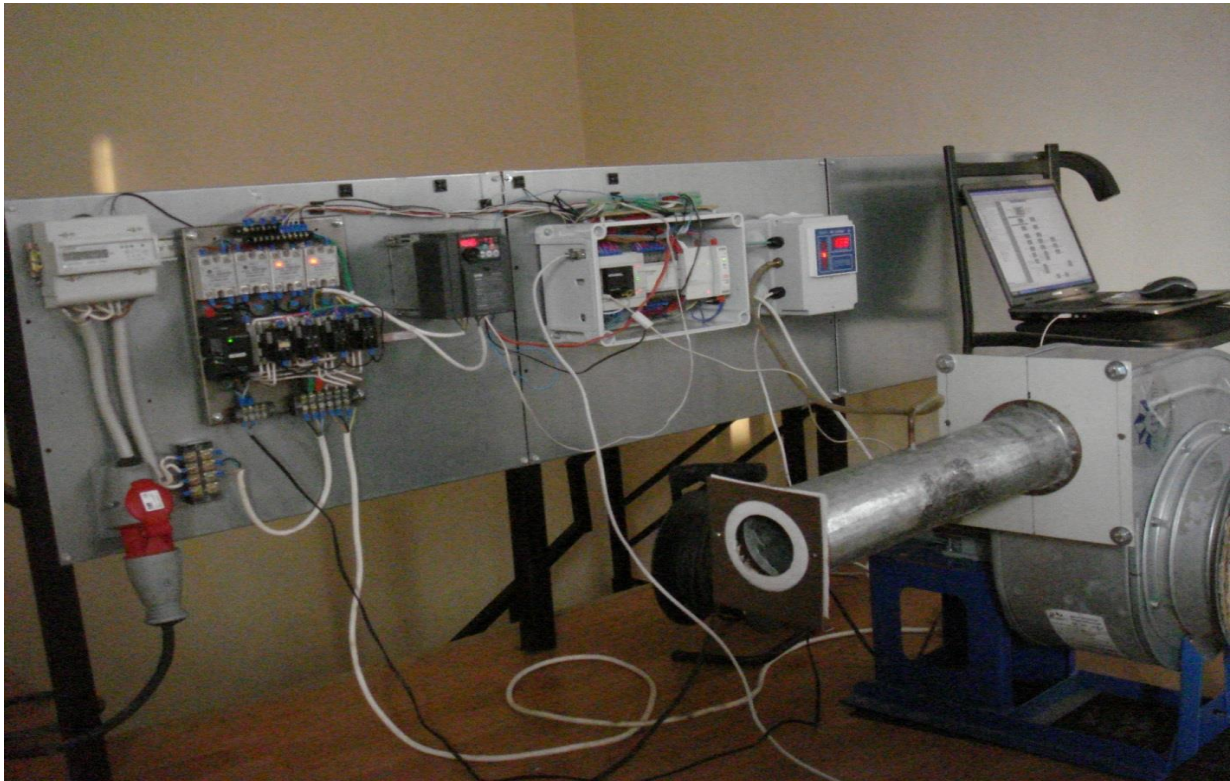


Рисунок 1 – Экспериментальная установка

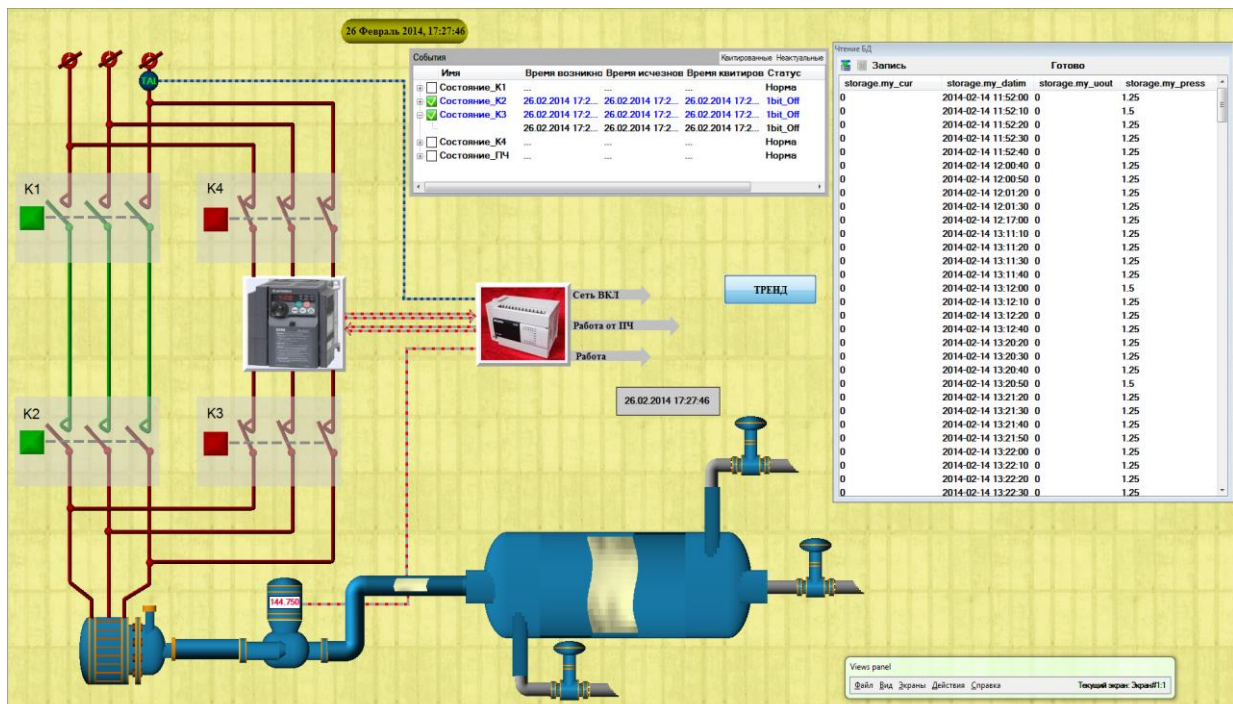


Рисунок 2 – Мнемосхема технологического процесса в экспериментальной установке

В работе установок с пневмо- и насосными станциями в процессе управления нагрузкой, могут применяться аналогичные методы регулирования, такие как: дросселирование, внедрение частотного регулирования и т.д. В соответ-

ствии с теорией подобия выводы об эффективности управления пневмоустановкой могут быть распространены и на гидроустановки (насосы).

Второй раздел посвящен анализу ситуации на розничном рынке электрической энергии. В рамках федерального закона от 01.05.2011 № 442 «О функционировании розничных рынков электрической энергии, полном и (или) частичном ограничении режима потребления электрической энергии» потребитель в зависимости от используемой максимальной мощности в точке балансового разграничения обязан выбрать наиболее подходящую для него ценовую категорию.

При этом для потребителей с установленной мощностью более 670 кВт данный выбор ограничен лишь ценовыми категориями с почасовым учетом или с почасовым учетом и планированием.

Анализ ситуации на розничном рынке ЭЭ можно охарактеризовать тем, что суммарные затраты на приобретение электрической энергии и мощности напрямую зависят от параметров графика электрической нагрузки, таких как: уровень потребления ЭЭ для каждого часа суток, значение сетевой мощности и мощности покупки а также от уровня полученных отклонений планового потребления электрической энергии от фактического значения.

Выбор ценовой категории при этом должен быть осуществлен исходя из минимума затрат на приобретение ЭЭ, что в свою очередь зависит от параметров графика нагрузки, таких как режимы работы оборудования и значения пиков ЭЭ в течение суток, которые наиболее сильно влияют на суммарные затраты на приобретение электрической энергии и мощности.

При этом потребителю для пятой и шестой ценовых категорий в конечный тариф включают стоимость отклонения планового потребления электрической энергии от фактического значения, и величина таких отклонений может быть очень высока. Поэтому перед потребителем встает вопрос о грамотном прогнозировании расходов электрической энергии.

Наряду с экономическим аспектом проблемы снижения стоимости денежных затрат на приобретение электроэнергии для объекта водоснабжения существует очевидная проблема низкой энергоэффективности работы насосных агрегатов в связи с использованием регулирования потока воды путем дросселирования задвижки. Как было отмечено выше, замена регулирования задвижкой на управление с использованием частотного привода электрической нагрузки позволяет достигнуть экономию ЭЭ в системах водоснабжения до 60 %. Однако подобные результаты отражают уровень технологического процесса, но не соответствуют уровню производства и не учитывают фактор стоимости потребленной ЭЭ и мощности.

Таким образом, цель оптимизационной задачи сводится к уменьшению затрат на электрическую энергию насосной станцией с учетом графика разбора воды, действующих тарифов и технологических требований, Инструментом достижения результата может служить внедрение в классический алгоритм векторного управления частотного привода системы координации- SCADA. При этом использование многосвязных систем, контролирующих сумму управляемых параметров, нацелено в первую очередь на снижение уровня потребления

электрической энергии, улучшение качества электрической энергии и непосредственно надежности производства.

Прогноз в таком случае становится элементом планово-финансового управления производством и позволяет оценить не только возможную экономию денежных средств за счет точного прогнозирования, но и позволяет выстраивать технологические режимы работы оборудования в зависимости от пиковых цен, регулируя, таким образом, значения мощности в пиковые часы региона.

Третий раздел посвящен анализу и подготовке исходных данных потребления электрической энергии насосной станции третьего подъема и формированию гипотезы прогноза. Одной из основных задач в прогнозировании является правильная подготовка данных. Любой график электрической нагрузки содержит как информацию о стабильных режимах работы оборудования, так и аномальные значения - «зашумленность» графика, вызванные резким изменением в работе основного технологического оборудования и воздействиями от режимов работы вспомогательного оборудования насосной станции.

В качестве метода подготовки данных для прогнозирования использован вейвлет-анализ с проведением всех этапов преобразования данных по потреблению электрической энергии для графика нагрузки насосной станции третьего подъема.

После проведения пороговой обработки данных и реконструкции ряда по аппроксимирующим и детализирующим коэффициентам получен график нагрузки, представленный на рисунке 3.

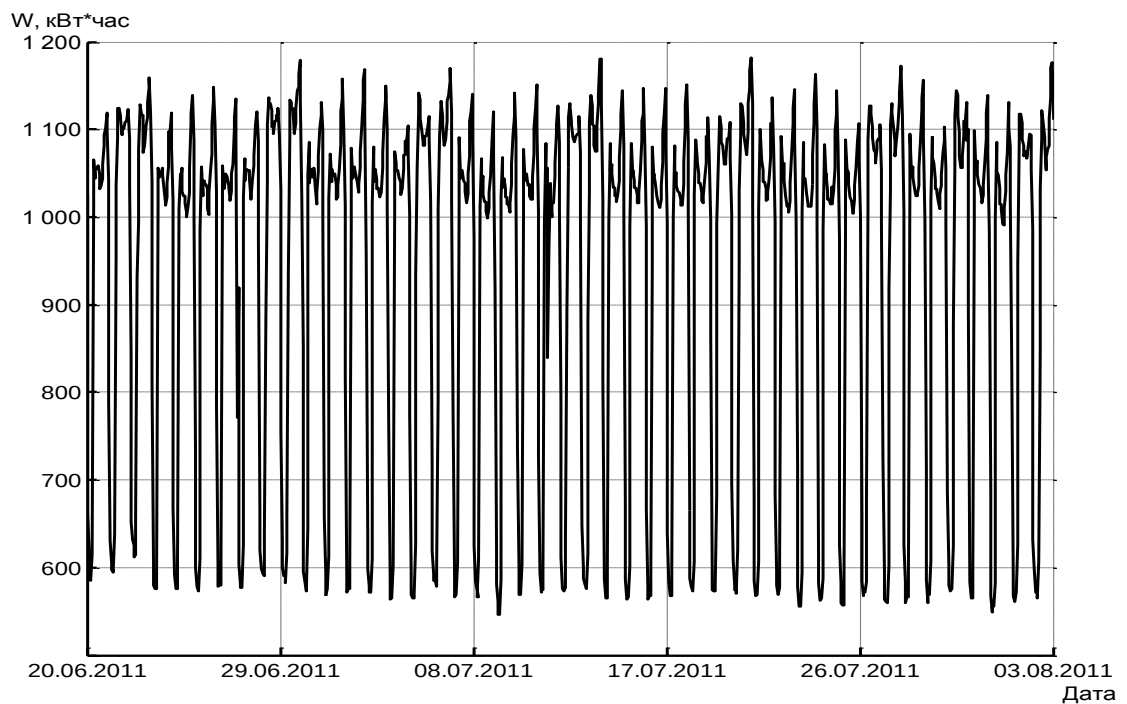


Рисунок 3 – Реконструкция графика нагрузки с исключением шумовых компонент

На основании данных графика нагрузки проверка на наличие статистической связи между переменными с использованием Q-тест Льюинга-Бокса. Был сделан вывод о том, что в графике нагрузки закономерность данных преобладает над случайными значениями, подтверждая устойчивость ряда данных.

Четвертый раздел посвящен однофакторному краткосрочному прогнозированию потребления электрической энергии насосной станции третьего подъема. В качестве исходных данных приняты почасовые значения потребления электрической энергии насосной станции третьего подъема ООО «Томскводоканал».

Исследован метод однофакторного прогнозирования методом авторегрессии интегрированного скользящего среднего (ARIMA). В качестве модели прогноза выбрана модель $ARIMA(1,1,1)$, как наиболее характеризующая поведение автокорреляционной функции ряда. На рисунке 4 приведен результат полученного прогноза.

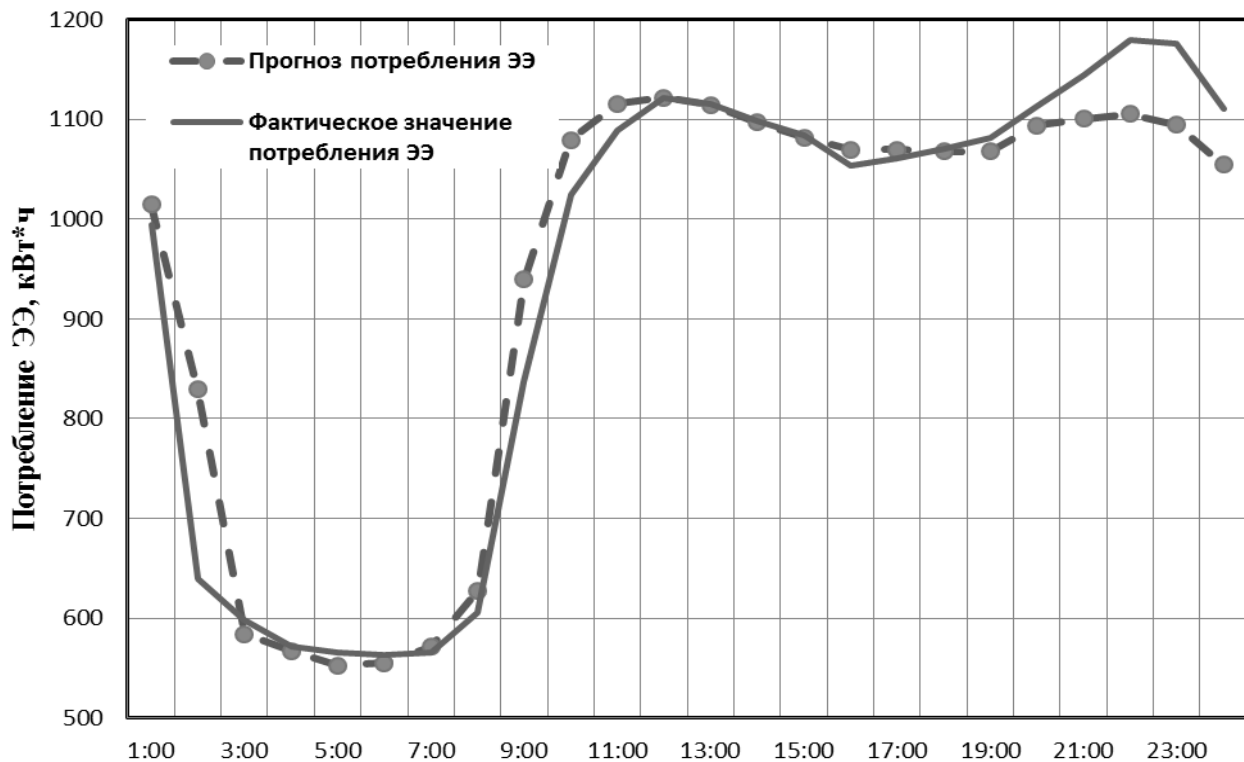


Рисунок 4 – Прогноз потребления ЭЭ «на сутки вперед» с использованием метода ARIMA

Относительная погрешность данного метода за горизонт прогноза составила 0,51 % от фактического потребления электрической энергии (сутки). Низкий процент погрешности за горизонт прогноза достигнут за счет того, что скользящая средняя дает функцию тренда, в наибольшей мере приближенную к значениям исследуемого ряда, поскольку для отдельных частей ряда выбирается наилучшая тенденция.

Но путем рассмотрения полученного прогноза для каждого часа в отдельности было выявлено, что данный метод прогноза основан на линейной комбинации предыдущих значений потребления электроэнергии и при наличии

резких изменений нагрузок в прошлом (например, аварийная ситуация), искажает текущие значения прогноза. И в часы максимума нагрузки это может привести к значительному увеличению величины и стоимости отклонений потребления ЭЭ.

С целью исключения из анализа аномальных всплесков потребления электрической энергии из «истории» данных, использован метод прогнозирования с использованием декомпозиции по вейвлет-базису.

Выполнено разложение графика нагрузки на аппроксимирующие и детализирующие коэффициенты с учетом кратномасштабного анализа по ортогональному базису и получен прогноз на сутки вперед для каждого из коэффициентов с использованием метода АРСС. Итоговый прогноз представляет собой сумму прогнозов коэффициентов. На рисунке 5 представлено сравнение результатов прогноза методом АРИМА и вейвлет-разложения.

Процент погрешности прогноза при вейвлет-разложении составил 0,2%, что меньше уровня класса точности регистрирующего прибора, и это говорит о том, что погрешность прогноза сведена практически к минимуму за счет исключения из исходных данных аномальных всплесков потребления электрической энергии.

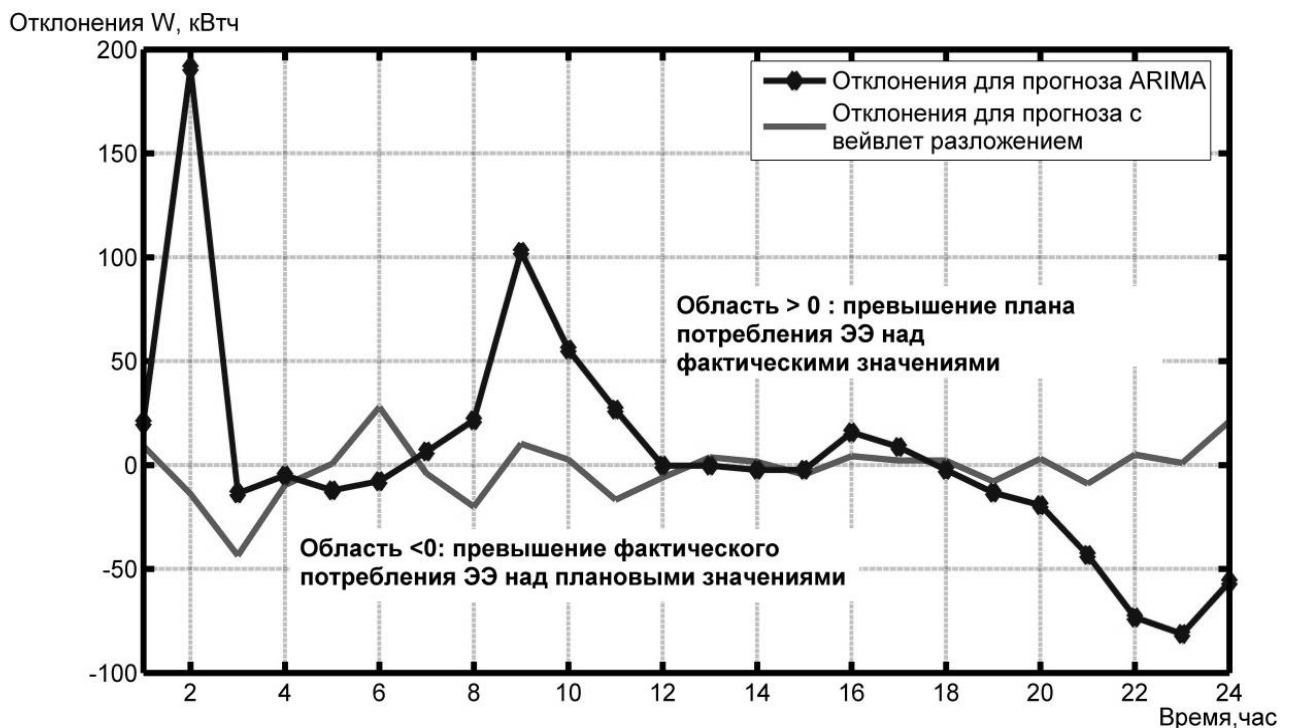


Рисунок 5 – График значений отклонений при прогнозировании методом АРИМА и вейвлет-разложением

Также для получения прогноза потребления ЭЭ применен метод нейронных сетей с погружением в нейросетевой логический базис. Метод основан на фундаментальной теореме Такенса, которая, основываясь на принципе повторяемости наблюдений, позволяет дать утвердительный ответ о принципах

альной возможности прогнозирования будущих значений ряда на основе конечного числа его предшествующих значений.

Для прогноза выбрана нейронная сеть оптимальной структуры.

Итоговый прогноз в приведенных единицах представлен на рисунке 6.

В результате исследования методов прогноза были сделаны выводы о том, что наиболее точными, применительно к данным графика электрической нагрузки насосной станции 3-го подъема, являются метод нейронных сетей и метод АРПСС с вейвлет-разложением. Но в связи с тем, что при вейвлет-анализе возможно исключение важных составляющих при пороговой обработке данных, и с учетом формирования адаптированной модели нейронной сети к графику нагрузки объекта водоснабжения, то для решения задач диссертационной работы был выбран метод нейронных сетей.



Рисунок 6 – Результат прогнозирования методом нейронных сетей с погружением в нейросетевой логический базис

Пятый раздел посвящен разработке алгоритма прогнозно-оптимизационного управления работой насосного агрегата технической воды и разработке имитационной модели фрагмента насосной станции 3-го подъема, осуществляющей подачу технической воды потребителю.

На основании реальных данных ООО «Томскводоканал», была создана имитационная модель системы водоснабжения, представленная на рисунке 7.

С целью решения задачи диссертационной работы, был сформирован алгоритм прогнозно-оптимизационного управления насосным агрегатом, представленный на рисунке 8.

В данном случае в классический алгоритм векторного управления частотного преобразователя добавлена SCADA система, которая фиксирует пока-

зания приборов учета, установленных на насосной станции, и включает в себя прогнозный и оптимизационный аппарат. SCADA система выполняет прогноз и отслеживает изменения тарифной политики выполняет прогноз потребления ЭЭ. Таким образом, учитывается тариф на ЭЭ, интенсивность водопотребления потребителя и степень наполнения резервуара. Частотный преобразователь в таком случае, работает не по фактической нагрузке, а на основании нагрузки, сформированной системой SCADA.

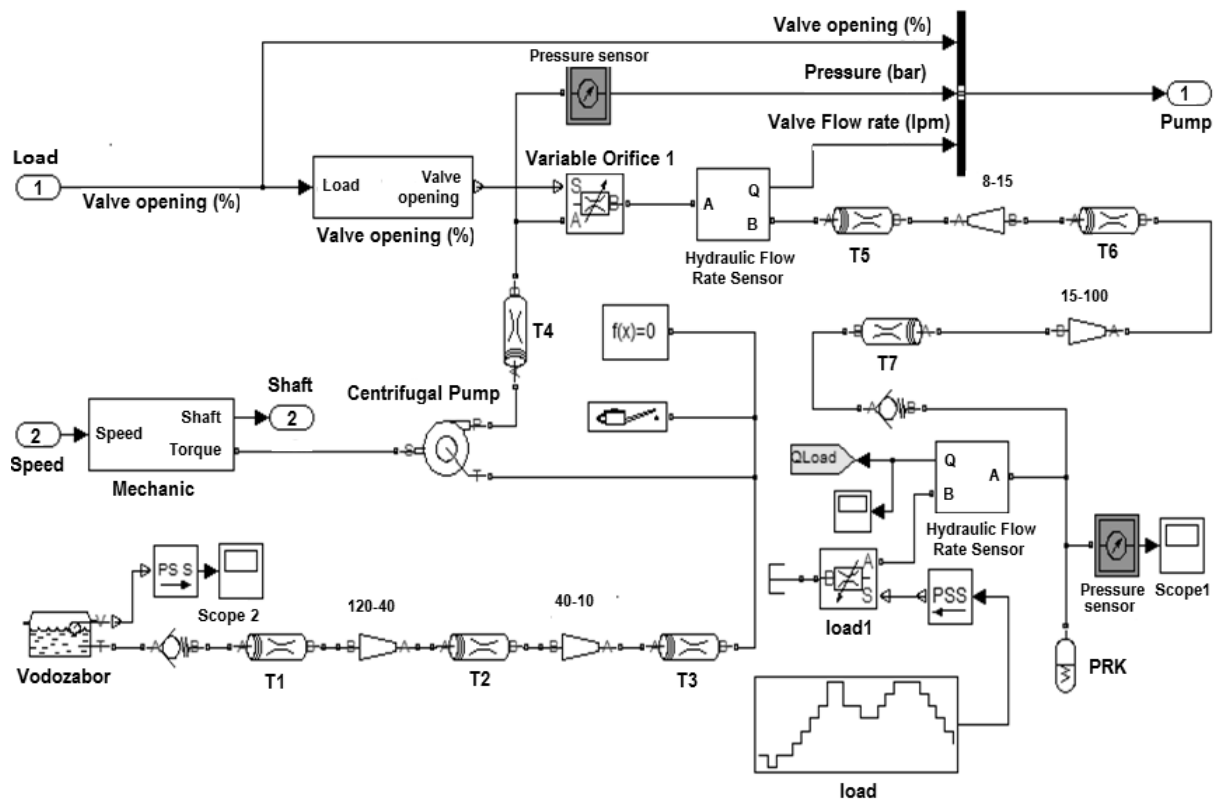


Рисунок 7 – Имитационная модель водопроводной сети

В соответствии с полученным алгоритмом прогнозно-оптимизационного управления и параметрами асинхронного двигателя построена имитационная модель насосной станции, представленная на рисунке 9.

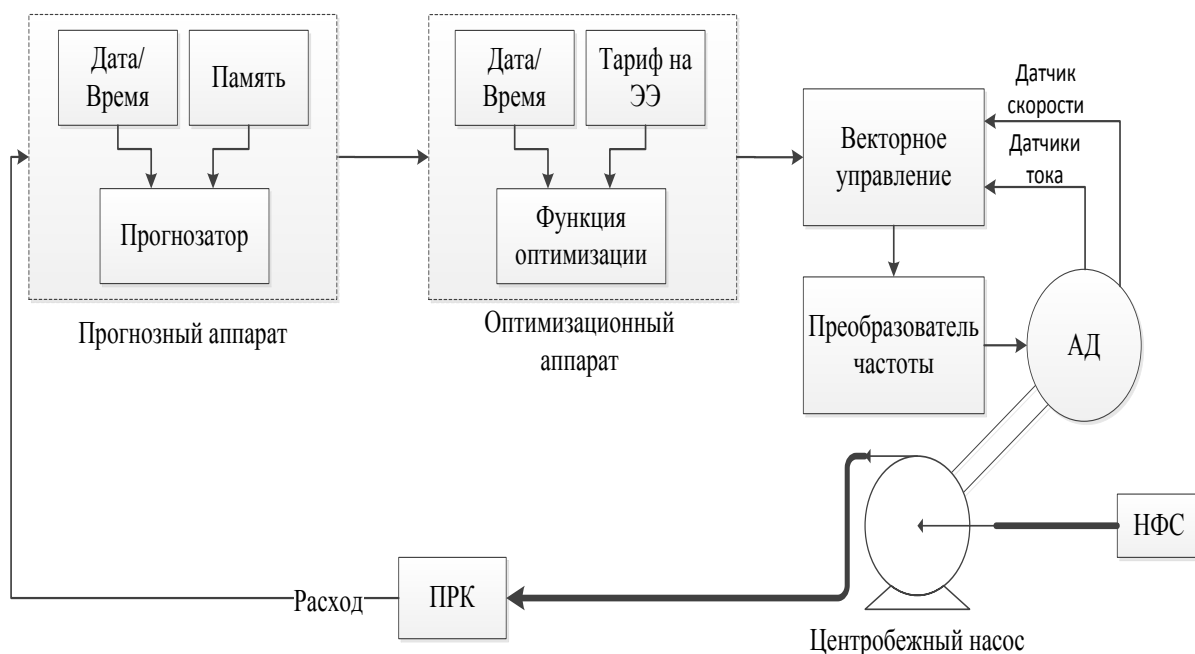


Рисунок 8– Алгоритм прогнозно-оптимизационного управления НС 3-го подъема

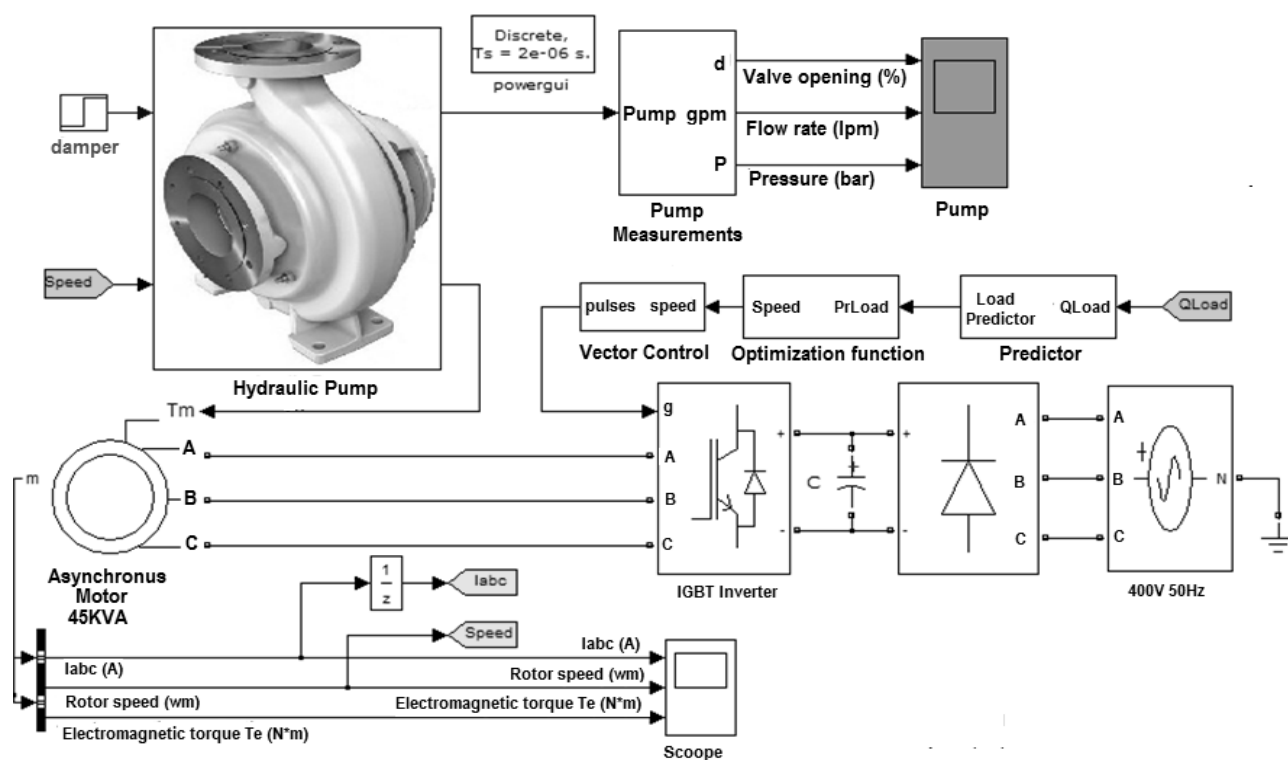


Рисунок 9 – Имитационная модель насосного агрегата с прогнозной оптимизацией

Полученные характеристики виртуальной модели соответствуют паспортным характеристикам асинхронного двигателя. На основании данной модели получены осциллограммы тока, тока и крутящего момента двигателя при

пуске и в установившемся режиме с целью доказательства тождественности параметров и характеристик полученной виртуальной модели и реального объекта, что подтверждает адекватность полученной имитационной модели.

На имитационной модели насосной станции было проведено регулирование электрической нагрузки путем дросселирования задвижки напорной линии и частотное регулирование числа оборотов вала насосного агрегата. На основании полученных зависимостей получены графики электрической нагрузки, совместно приведенные на рисунке 10.

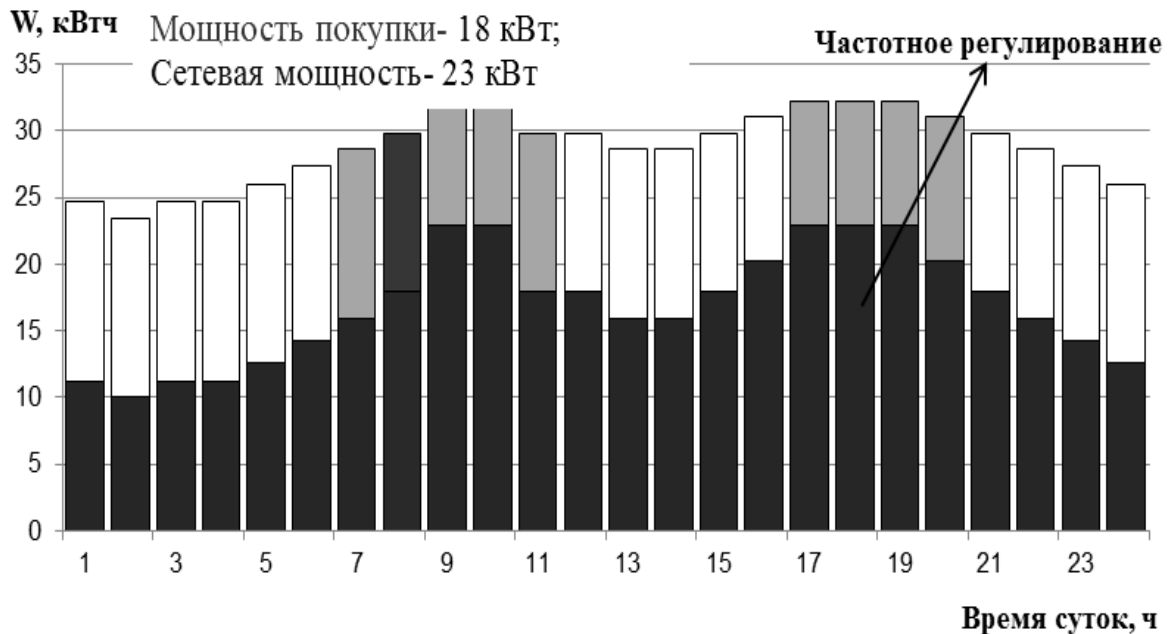


Рисунок 10– Суточный график потребления электроэнергии насосом при частотном регулировании и при дросселировании задвижки

Для исследования метода прогнозно-оптимизационного регулирования в работе была задана целевая функция оптимизации, которой является минимум затрат на приобретение электрической энергии при соблюдении графика водопотребления согласно формуле (1).

$$Z_{ЭЭ} = \sum_{i=1}^{24} W_i \cdot C_i + P_{II} \cdot C_{II} / 30 + P_{\max} \cdot C_{\max} / 30 + \sum_{i=1}^{24} W_i \cdot C_{\text{прочие}} + \sum_{i=1}^{24} W_i^+ \cdot C_i^+ + \sum_{i=1}^{24} W_i^- \cdot C_i^- \rightarrow \min \quad (1)$$

где W_i – потребляемая энергия за час, кВтч;

C_i – ставка за ЭЭ каждого часа, руб/кВтч;

P_{II} – мощность, оплачиваемая на оптовом рынке (определяется по пиковому часу энергосистемы), кВт;

C_{II} – ставка за мощность, приобретаемую потребителем по предельному уровню нерегулируемых цен, руб/кВт в месяц;

$P_{\max}$ – сетевая мощность, оплачиваемая потребителем как мощность за услуги передачи ЭЭ, кВт (определяется как максимальная мощность из пла-

новых часов пиковой нагрузки утвержденных администратором торговой системы в зависимости от ценовой зоны потребителя);

$C_{\max}$ – ставка за мощность на оказание услуг по передаче ЭЭ, руб/кВт в месяц;

$C_{\text{прочие}}$ – плата за иные услуги, в которые входит организация оперативно-диспетчерского обслуживания и плата администратору торговой системы за организацию торгов на оптовом рынке, руб/кВт*ч;

W_i^+ – величина превышения фактического объема потребления электроэнергии над плановым значением, кВт*ч;

C_i^+ – нерегулируемая цена на ЭЭ, дифференцируемая по часам расчетного периода на оптовом рынке, определяемая коммерческим оператором в отношении объема превышения фактического потребления над плановым потреблением для каждого часа расчетного периода, руб/кВт*ч;

W_i^- – величина превышения планового объема потребления электроэнергии над фактическим значением, кВт*ч;

C_i^- – нерегулируемая цена на ЭЭ, дифференцированная по часам расчетного периода на оптовом рынке, определяемая коммерческим оператором в отношении объема превышения планового потребления над фактическим потреблением в час (i) расчетного периода.

Решение оптимизационной задачи на основании полученной зависимости подачи воды и потребляемой мощности выполнено с использованием метода обобщенного приведенного градиента (ОПГ) .

В результате прогнозно-оптимизационного регулирования и использования резервуара технической воды:

- в часы минимума нагрузки энергосистемы теперь происходит наполнение резервуара, за счет этого увеличивается расход ЭЭ насосного агрегата по сравнению со стандартной схемой управления насосным агрегатом с ЧРП;

- в часы максимума нагрузки энергосистемы теперь насосный агрегат потребляет минимум ЭЭ, и ПРК осуществляет расход воды из накопительного резервуара.

Таким образом, происходит снижение объема покупки электроэнергии и мощности по максимальной цене и увеличение доли покупки по минимальной цене. На рисунке 11 представлен график нагрузки при классическом частотно-регулируемом приводе и при прогнозной оптимизации.

Совместный график зависимости потребления мощности и стоимости ЭЭ от времени суток подтверждает, что в случае исследуемой схемы водоснабжения при внедрении прогнозной оптимизации был установлен новый порядок отношений на розничном рынке.

В часы пика региона, ООО «Томскводоканал» для данной насосной станции заплатит меньшую стоимость, чем при классическом способе регулирования электрической нагрузки и приобретет необходимый объем ЭЭ и мощности в часы минимальной стоимости за счет наличия аккумулирующей емкости.

Таким образом, внедрение такого способа регулирования и использования резервуара технической воды позволяет разорвать корреляционную связь между графиком нагрузки насосной станции и графиком водопотребления.

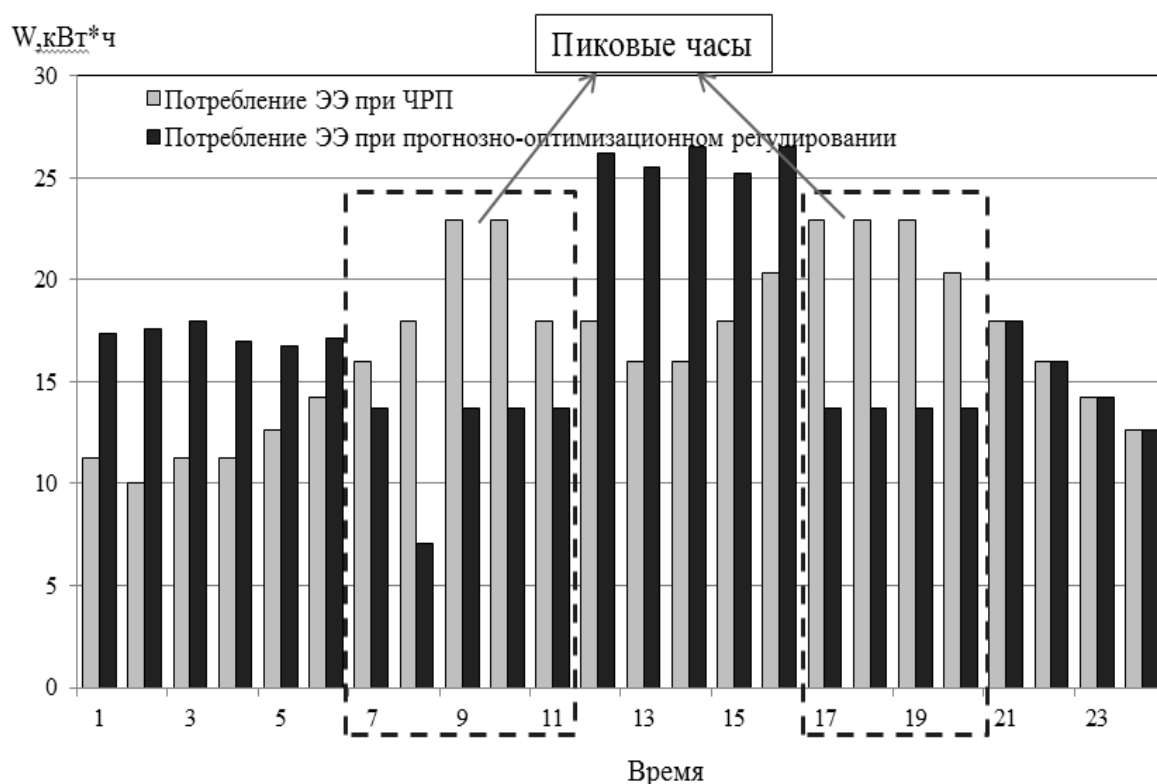


Рисунок 11 – Графики нагрузки при классическом ЧРП и при внедрении блока оптимизации и прогнозирования

На основании предельных уровней цен, для каждого способа регулирования проведен расчет суммарных суточных затрат на приобретение ЭЭ и мощности. В соответствии с таблицей 1 следует, что при использовании прогнозно-оптимизационного регулирования электрической нагрузки насосной станции происходит снижение затрат на приобретение электрической энергии в размере 26 % по сравнению с классическим частотным регулированием.

Таблица 1. Затраты и потребление ЭЭ

Способ регулирования	Потребленная ЭЭ за сутки, кВтч	Суточные затраты на ЭЭ, руб
Дросселирование	691,2	1838,8
Изменение частоты вращения насоса	406,4	1180,7
Изменение частоты вращения насоса с использованием оптимизационной функции и прогноза потребления	411,2	870,6

Таким образом, можно говорить о полученном экономическом эффекте. Однако если говорить об электрической эффективности, то значение потреб-

ленной ЭЭ за сутки осталось на уровне классического частотного регулирования.

Также в работе было проведено регулирование электрической нагрузки по закону повторно-кратковременного режима. Данный способ регулирования не приводит к экономии затрат на ЭЭ. Но данный способ может найти применение в системах водоотведения, где график расхода имеет периодический характер. Так же данный способ не требует дорогостоящего оборудования, таких, как ПЧ, а необходимо лишь устройство плавного пуска.

Шестой раздел посвящен оценке эффективности работы нагнетающего оборудования с использованием прогнозной оптимизации. Этапы методики прогнозирования и оптимизации аналогичны рассмотренным при проведении эксперимента на имитационной модели. Имея накопитель (ресивер), появляется возможность разорвать корреляцию графика нагрузки электрической энергии и уровня потребления воздушного потока по аналогии с использованием резервуара технической воды на насосной станции третьего подъема.

Графики электрической нагрузки при частотном регулировании и регулировании с использованием прогнозно-оптимизационного управления представлены на рисунке 12.

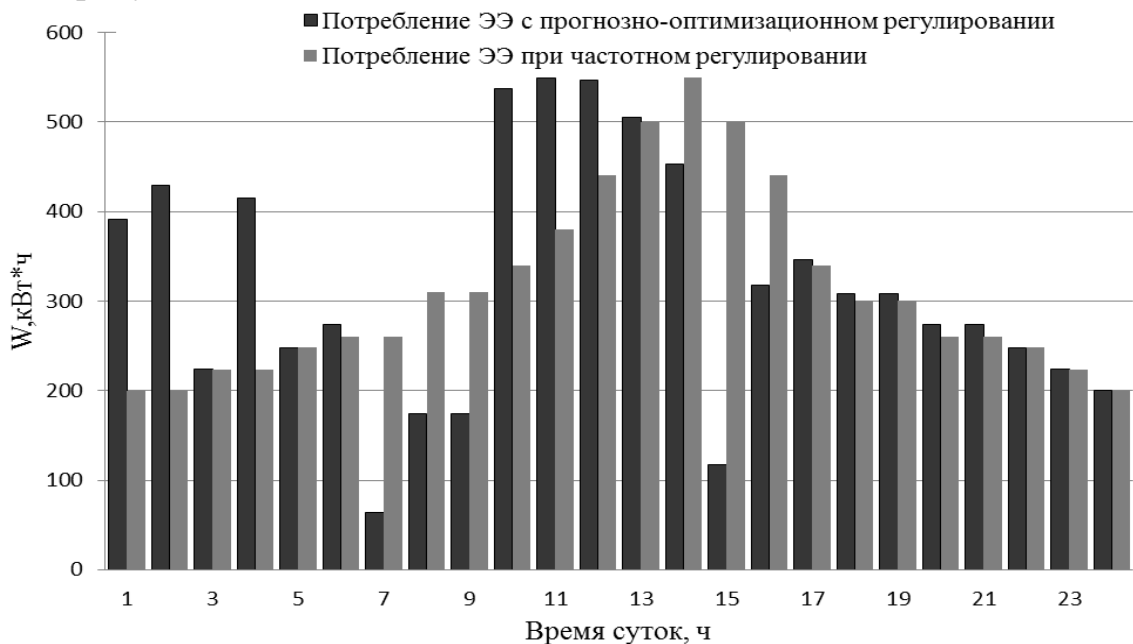


Рисунок 12 – Результат регулирования электрической нагрузки для нагнетающего оборудования

Реализованная структура системы управления работой нагнетающей установки полностью аналогична системе управления насосной станции, различно только программное наполнение, учитывающее действительные условия работы нагнетающей установки. Полученные в данной главе результаты доказывают, что прогнозно-оптимизирующее управление в сочетании с учетом ценовой политики позволяют достичь для нагнетающих систем значительной экономии денежных средств до 24 % по значениям пиковой мощности и мощности покупки, и до 2 % по стоимости ЭЭ. В связи с тем, что объем ресивера не

большой и сама установка не большой мощности (55 Вт), то полученная экономия не существенна. Но при больших мощностях нагнетающих установок прогнозно-оптимизационное управление позволит снижать суммарные затраты на приобретение электрической энергии и мощности в гораздо больших объемах.

Таким образом, в результате проведенного эксперимента можно сделать вывод о том, что полученные результаты для имитационной модели и для эксперимента качественно тождественны.

В **заключении** приведены основные положения и выводы диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. На основании проведенной оценки ситуации на розничном рынке в качестве метода прогнозирования был выбран метод нейронных сетей, как наиболее адаптированный к графику электрической нагрузки насосной станции. Достигнутая погрешность прогноза методом нейронных сетей составила менее 1%;
2. Разработан алгоритм работы насосной станции при прогнозно-оптимизационном регулировании и разработана имитационная модель насосной станции;
3. Установлено, что в сравнении с другими способами регулирования электрической нагрузки прогнозная оптимизация режима работы насосной станции ведет к уменьшению затрат на ЭЭ на 26%, но в тоже время количество потребляемой электрической энергии осталось на уровне классического ЧРП. Следовательно, отсутствует электроэффективность на уровне технологического процесса при доказанной экономической эффективности;
4. На основании проведенного эксперимента была доказана тождественность принципа прогнозно-оптимизационного регулирования для имитационной модели и для экспериментальной установки.

Основное содержание диссертации изложено в работах:

Статьи, опубликованные в изданиях, входящих в базу данных Scopus

1. **Babinovich, D. E.** Forecast and optimization device for the mode control of a pumping station/ D.E. Babinovich, E.A Shutov// First International Conference on Energy Production and Management in the 21st Century: The Quest for Sustainable Energy (Energy Quest 2014). — Ekaterinburg, 2014. — Vol.2. — P.501-511.

Статьи, опубликованные в периодических научных изданиях, рекомендованных ВАК

2. **Бабинович, Д.Е.** Прогнозирование потребления электрической энергии на объектах водоснабжения/ Д.Е.Бабинович, Е.А.Шутов , Т.Е. Турукина // Энергетик. — 2016. — № 1. — С. 7-10.
3. **Бабинович, Д.Е.** Уровни оптимизации режима работы оборудования насосной станции/ Д.Е.Бабинович, Е.А.Шутов // Промышленные АСУ и контроллеры. — 2014. — № 1. — С. 10-14.

4. **Бабинович, Д.Е.** Оптимизация режима работы насосной установки/ Д.Е.Бабинович, Е.А.Шутов, Т.Е.Турукина// Энергосбережение и водоподготовка. — 2014. — № 6 (92). — С. 59-62.
5. **Бабинович, Д.Е.** Роль прогнозирования в энергоэффективности предприятий /Д.Е.Бабинович, Е.А.Шутов, Т.Н.Кирилова, Т.Е.Турукина// Энергобезопасность и энергосбережение. — 2012. — №. 6. — С. 27-33.
6. **Бабинович, Д.Е.** Проблемы прогнозирования потребления электроэнергии / Д.Е.Бабинович, Е.А.Шутов, Т.Н.Кирилова// Проблемы энергетики. — 2010.— №.3-4/I. — С. 49-58.
7. **Бабинович, Д.Е.** Многофакторное прогнозирование потребления электрической энергии промышленным и бытовым секторами/ Д.Е.Бабинович, Г.Н.Климова, Е.А.Шутов, Т.Н.Кирилова//Промышленная энергетика. —2010. — № 6. — С. 24-30.

Статьи, опубликованные в профильных энергетических журналах

8. **Бабинович, Д.Е.** Многофакторное прогнозирование потребления электроэнергии в промышленном и бытовом секторах / Д.Е.Бабинович, Г.Н.Климова, Е.А.Шутов, Т.Н.Кирилова //Энергорынок. — 2009. — № 11. — С. 40-45.

Материалы международных, всероссийских и университетских конференций, форумов, семинаров

9. **Babinovich, D.E.** Level-to-level relationship of a pumping station control / D.E. Babinovich, E.A. Shutov, T.E. Turukina // 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST - 2016). — Novosibirsk: NSTU, 2016. — Vol. 1. — P. 150-154.
10. **Бабинович, Д.Е.** Режим прогнозной оптимизации работы насосной станции / Д.Е.Бабинович, Е.А.Шутов, Т.Е. Турукина // Электромеханические преобразователи энергии: материалы VI Международной научно-технической конференции. — Томск, 9-11 Октября 2013. — Томск: ТПУ, 2013. — С. 262-267.
11. **Бабинович, Д.Е.** Прогнозирование потребления электроэнергии насосной станцией третьего подъема / Д.Е.Бабинович // Энергосбережение - теория и практика: материалы международной молодежной научной школы. — Томск, 11-12 Сентября 2012. — Томск: СПб Графикс, 2012. — С. 52-55.
12. **Бабинович, Д.Е.** Прогнозирование потребления электроэнергии для объектов водоснабжения /Д.Е.Бабинович // Химическая физика и актуальные проблемы электроэнергетики: сборник тезисов и докладов Всероссийской молодежной конференции/ Национальный исследовательский Томский политехнический университет. — Томск: Изд-во ТПУ, 2012. — С. 19-24.
13. **Бабинович, Д.Е.** Особенности прогнозирования потребления электроэнергии для промышленных предприятий/ Д.Е.Бабинович //Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования: Материалы V Всероссийской научно-технической конференции. — Томск, 17-18 мая 2012. — Томск: ТПУ, 2012. — С. 99-100.
14. **Бабинович, Д.Е.** Прогнозирование потребления электроэнергии промышленным предприятием // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика:

труды Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. — Томск, 6-8 Октября 2011. — Томск: СПБ Графикс, 2011. — Т.2. — С. 46.

15. **Бабинович, Д.Е.** Краткосрочное прогнозирование потребления электроэнергии предприятием / Д.Е.Бабинович, Е.А.Шутов, Т.Н.Кирилова // Локальная энергетика: опыт, проблемы, перспективы развития: сборник материалов научно-практической конференции. — Якутск, 20-21 Декабря 2010. — Томск: Изд-во ТПУ, 2011. — С. 8-10.

16. **Бабинович, Д.Е.** Прогнозирование электропотребления промышленным сектором с помощью нейросетевых методов/ Д.Е.Бабинович// Энергетика: экология, надежность, безопасность: Труды XII Всероссийского студенческого научно-технического семинара. — Томск, 20-23 апреля 2010. — Томск: ТПУ, 2010. — С. 50-54.

17. **Бабинович, Д.Е.** Прогнозирование электропотребления промышленным сектором с помощью нейросетевых методов/ Д.Е.Бабинович// IV чтения Ш. Шокина: Материалы IV Международной научно-технической конференции. — Павлодар: ПГУ им.С. Торайгырова, 2010. — С.142-146

18. **Бабинович, Д.Е.** Краткосрочное прогнозирование потребления электроэнергии на сутки вперед /Д.Е.Бабинович // Наука. Технологии. Инновации: Материалы всероссийской научной студенческой конференции молодых ученых. — Новосибирск, 4-5 декабря 2009. — Новосибирск: НГТУ, 2009. — С. 82-85.

19. **Бабинович, Д.Е.** Многофакторное прогнозирование выработки электроэнергии// Современные техника и технологии: Сборник трудов XV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. — Томск, 4-8 мая 2009. — Томск: ТПУ, 2009 — С. 12-14.

20. **Бабинович, Д.Е.** Многофакторное прогнозирование в электроэнергетике/ Д.Е.Бабинович // Энергетика: экология, надежность, безопасность: Труды XI Всероссийского студенческого научно-технического семинара. — Томск, 21-25 апреля 2009. — Томск: ТПУ, 2009. — С.105-108.

21. **Бабинович, Д.Е.** Многофакторное прогнозирование потребления электроэнергии промышленным и бытовым сектором/Д.Е.Бабинович //Всероссийский открытый конкурс на лучшую научную работу студентов вузов 2009 года. Раздел 51. «Автоматизация промышленных установок и технических комплексов». Институтский тур всероссийского открытого конкурса: Каталог заявленных работ. — Томск, 15-30 января 2010. — Томск: ТПУ, 2010. — С. 75.