

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

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»

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель  
доктор физико-математических наук,  
профессор А.В. Кабышев

Томск - 2016

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                                                                                       |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ВВЕДЕНИЕ.....                                                                                                                         | 4   |
| ГЛАВА 1. Оценка эффективности работы насосно-нагнетающего оборудования .....                                                          | 12  |
| ГЛАВА 2. Анализ ситуации на розничном рынке электроэнергии и мощности ..                                                              | 23  |
| ГЛАВА 3. Анализ исходных данных и проверка гипотезы прогноза .....                                                                    | 28  |
| ГЛАВА 4. Прогнозирование потребления электрической энергии насосной станции третьего подъема .....                                    | 42  |
| 4.1 Однофакторное прогнозирование методом авторегрессии проинтегрированного скользящего среднего.....                                 | 43  |
| 4.2 Однофакторный прогноз потребления электрической энергии с декомпозицией по вейвлет-базису.....                                    | 48  |
| 4.3 Прогнозирование потребления электрической энергии эконометрическим методом ARMA/GARCH.....                                        | 56  |
| 4.4 Прогнозирование потребления электрической энергии с использованием нейронных сетей.....                                           | 61  |
| ГЛАВА 5. Прогнозная оптимизация работы насосной установки .....                                                                       | 67  |
| 5.1 Основные параметры работы технологического оборудования насосной станции третьего подъема .....                                   | 67  |
| 5.2 Математическая модель асинхронного двигателя.....                                                                                 | 71  |
| 5.3 Имитационная модель насосной станции третьего подъема .....                                                                       | 83  |
| 5.4 Оценка энергетической эффективности способов регулирования насосного агрегата.....                                                | 92  |
| 5.4.1 Дросселирование задвижки напорной линии .....                                                                                   | 92  |
| 5.4.2 Регулирование числа оборотов вала насосного агрегата.....                                                                       | 97  |
| 5.4.3 Регулирование числа оборотов насосного агрегата с использованием оптимизации и прогноза потребления электрической энергии ..... | 101 |
| 5.4.4 Регулирование нагрузки по закону повторно-кратковременного режима.....                                                          | 108 |

|                                                                                                                                           |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ГЛАВА 6. Оценка эффективности работы нагнетающего оборудования с использованием оптимизации и прогноза потребления электрической энергии. | 113 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....                                                                                                                          | 120 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....                                                                                                     | 123 |
| Приложение 1. Предельные уровни цен на электроэнергию и мощность .....                                                                    | 133 |
| Приложение 2. Технические параметры частотного преобразователя .....                                                                      | 135 |
| Приложение 3. Характеристики насоса .....                                                                                                 | 136 |
| Приложение 4. Акт использования результатов .....                                                                                         | 140 |

## **ВВЕДЕНИЕ**

### **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 энергосбережении. Такая заинтересованность для предприятий возникает вследствие ежегодного роста тарифов на энергоносители [1].

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 [2].

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% [3].

Основным из самых эффективных способов 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 частотного регулируемого привода 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.

Для ООО «Томскводоканал» решением вопроса повышения энергоэффективности может стать оптимизация работы оборудования за счет внедрения в структуру управления насосными агрегатами технической воды

функции оптимизации и прогноза потребления ЭЭ на базе частотного - регулируемого привода.

Такое использование частотно-регулируемого привода 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 способ 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 получить 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 [4], А.В. Афанасьева [5], Д.Петрова [6], И.А.Сыромятникова [7], В.Б.Воздвиженского [8], Г.Б.Лазарева [9] Г.Б.Онищенко [10], Г.Г.Соколовского [11] 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 [12-14].

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 [15].

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 оптимизацией, таких как разработка алгоритма прогнозно-оптимизационного регулирования электрической нагрузки насосной станции, выбор оптимального метода прогнозирования, наиболее адаптированного к графику электрической нагрузки насосной станции, проведение экономического обоснования эффективности использования такого способа регулирования электрической нагрузки.

**Идея работы:** 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 работы 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 графиком электрической нагрузки насосной станции выбран метод прогноза, который позволяет получить наименьшую погрешность и минимальную стоимость отклонении прогнозного

потребления ЭЭ от фактического значения.

2. Разработан алгоритм прогнозно-оптимизационного управления, при котором в зависимости от прогноза потребления электрической энергией, 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 исследования 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. Для обработки данных использованы программные продукты: MS Excel, Mathcad 14.0, Matlab 2013a, Statistica 6.0.

#### **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 работы 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); научна-

практическая конференция «Локальная энергетика: опыт, проблемы, перспективы развития» (г. Якутск); XII Всероссийской студенческий научно-технический 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 опубликовано 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.

#### **Краткое содержание диссертации.**

В *первой главе* диссертации проводится оценка использования частотного регулируемого привода в промышленности, в частности для нагнетающего оборудования на примере реальной экспериментальной установки.

Во *второй главе и третьей главе* рассмотрена и проанализирована текущая ситуация на розничном рынке электрической энергии и произведен анализ графика нагрузки объекта водоснабжения с выделением гипотезы прогноза.

В *четвертой главе* подробно изучены методы однофакторного прогнозирования потребления ЭЭ применительно к насосной станции третьего подъема.

В *пятой главе* была сформирована имитационная модель фрагмента насосной станции третьего подъема и на примере данной модели изучены методы регулирования нагрузки насосного агрегата технической воды. Также в *пятой главе* на базе имитационного модели сформирован алгоритм программирования прогнозно-корректирующего регулятора, оптимизирующего режим работы насосного агрегата технической воды, и произведена оценка экономической эффективности прогнозно-оптимизационного регулирования по сравнению с классическими способами регулирования нагрузки насосного агрегата в условиях текущего функционирования розничных рынков ЭЭ и мощности.

В *шестой главе* описан аналогичный эксперимент с прогнозно-оптимизирующим регулированием на примере нагнетающей установки с целью доказательства эффективности внедрения прогнозно-корректирующего регулятора.

В *приложениях* представлены предельные уровни цен на электроэнергию и мощность, технические параметры частотного преобразователя Altivar 212, характеристики насоса Grundfos NB 80-200/211 Premium и акт об использовании результатов диссертационной работы на ООО «Томскводоканал».

## **ГЛАВА 1. Оценка эффективности работы насосно-нагнетающего оборудования**

Контроль параметров технологического процесса, содержащего насосные и воздуходувные установки, под управлением *SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition)* системы и применение частотного регулирования двигателей насосных агрегатов обусловлено рядом известных преимуществ [16]. Плавный пуск/торможение, глубина регулирования и экономия электроэнергии до 50%, в сравнении с дросселированием, являются критериями установки частотно-регулируемого привода. Классическим вариантом структуры частотного преобразователя, в широком спектре предлагаемой производителями данной аппаратуры, является применение векторного или адаптивного управления скоростью насосного/воздуходувного агрегата. Таким образом, обеспечивается и ширина диапазона регулирования, и вариативность изменения параметров регулятора или структуры регулятора в зависимости от изменения параметров объекта управления либо внешних возмущений, действующих на объект управления. Недоиспользованность в магнитном отношении электрической машины, управляющей ротором центробежного насоса, частично снимается применением асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором и классом электроэффективности А [16].

Эффективность использования частотно - регулируемого привода можно оценить на примере нагнетающей установки.

На рисунке 1.1 представлена структурная схема такой установки.

Данная схема представляет собой систему приточной нагнетающей установки с функцией обогрева. На первом этапе осуществляется подача воздуха в нагнетающий воздуховод, где на входе установлен привод заслонки (1), осуществляющий регулирование подачи воздуха в нагнетающую установку. Элемент (2) представляет собой фильтр, установленный с целью очистки воздуха. Элемент (3) непосредственно представляет собой приточный вентилятор, который нагнетает скорость воздуха и подает на электрический воздухонагреватель (4).

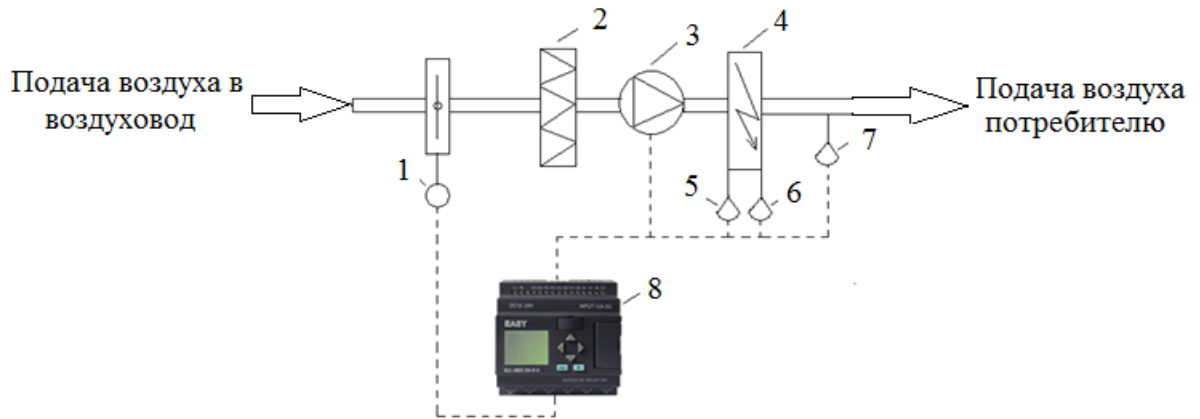


Рисунок 1.1 – Структурная схема нагнетающей установки

Температура воздуха контролируется аварийным термостатом (5) и датчиком защиты от перегрева (6). На выходе нагнетающей установки может быть установлен также каналный датчик температуры (7). Данные с элементов (5), (6), (7) подаются на контроллер (8). Для оптимальной работы всей системы контроллер должен, во-первых, поддерживать заданную температуру и управлять оборотами приточного вентилятора. Во-вторых, он должен автоматически включать вентилятор при включении электрокалорифера и выдавать сигнал управления на открытие/закрытие воздушной заслонки при включении/выключении вентилятора. Также контроллер должен обеспечивать блокировку включения вентилятора и электрокалорифера при их перегреве или по внешним аварийным сигналам [17].

В эксперименте объектом исследования выступает реальная установка центробежного вентилятора низкого давления, представленная на рисунке 1.2.

Основными элементами данной установки выступают:

1. **Датчик давления** - измеритель-регулятор АДН/АДР, который представляет собой законченный прибор, в котором объединены: первичный датчик давления (разрежения), микропроцессорный узел обработки и два индикатора (цифровой и барографический);

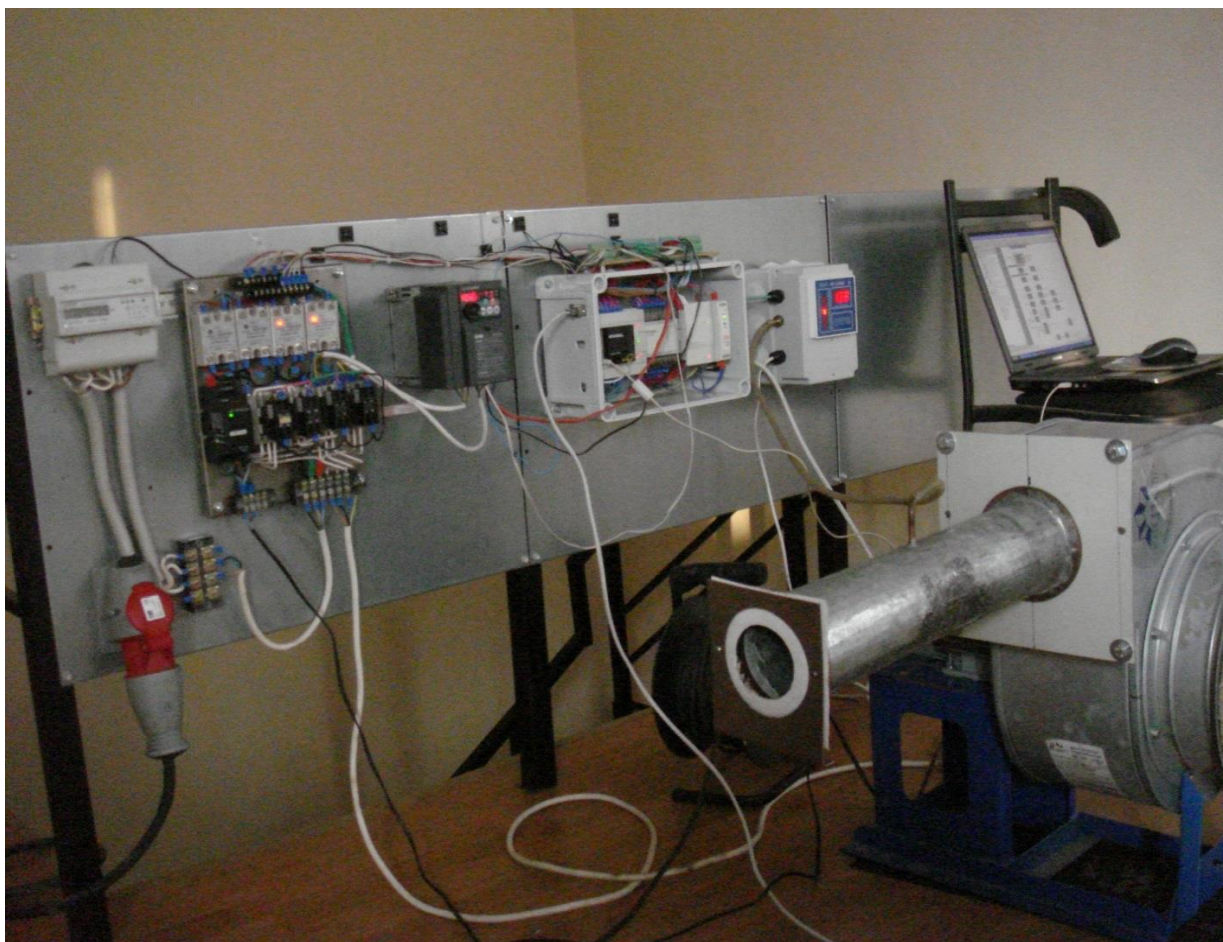


Рисунок 1.2 – Экспериментальная установка

Основными элементами данной установки выступают:

2. **Блок питания частотного регулятора** - одноканальный блок питания ОВЕН БП15Б-Д2;

3. **Преобразователь частоты (ПЧ)** – преобразователь частоты фирмы «MitsubishiElectric» марки *FR – D700 SC*. Преобразователь *FR – D700 SC* преобразует неизменное напряжение и частоту электросети в изменяемое напряжение с изменяемой частотой. Он встраивается между питающей сетью и двигателем и позволяет бесступенчато регулировать частоту вращения.

4. **Приводной механизм** - в качестве приводного механизма вентилятора используется асинхронный двигатель марки АИР56В2 мощностью 0,55 кВт, представленный на рисунке 1.3. Основные параметры электродвигателя приведены в таблице 1.1.



Рисунок 1.3 – Асинхронный электродвигатель АИР56В2 [18]

Таблица 1.1 – Основные данные электродвигателя АИР63В2

| Наименование показателя  | Значение показателя |
|--------------------------|---------------------|
| Частота вращения, об/мин | 2730                |
| КПД, %                   | 75                  |
| Коэффициент мощности     | 0,81                |
| $I_p/I_n$                | 5                   |
| $M_p/M_n$                | 2,2                 |
| $M_{max}/M_n$            | 6,6                 |
| Ток статора, А           | 1,31                |

5. **Вентилятор** - В качестве вентиляторной нагрузки принят радиальный вентилятор ВЦ 4 – 75, представленный на рисунке 1.4.



Рисунок 1.4 – Радиальный вентилятор ВЦ 4 – 75 [19]



Основные параметры вентилятора приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Основные технические данные вентилятора ВЦ 4 – 75 [20]

| Типо-<br>размер<br>вентилято<br>ра | Конструкт<br>ивное<br>исполнени<br>е | Двигатель       |                      |                                        | Частота<br>вращени<br>я<br>рабочего<br>колеса,<br>об/мин | Параметры в<br>рабочей зоне                     |                                    | Масса<br>вентиля-<br>тора,<br>не более,<br>кг<br>(без<br>двигателя | Сумма<br>рный<br>уровен<br>ь<br>звуков<br>ой<br>мощно<br>сти, ДБ |
|------------------------------------|--------------------------------------|-----------------|----------------------|----------------------------------------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
|                                    |                                      | Типо-<br>размер | Мощн<br>ость,<br>кВт | Частота<br>вращения<br>вала,<br>об/мин |                                                          | Произво<br>-дитель-<br>ность,<br>тыс.<br>м3/час | Полно<br>е<br>давле-<br>ние,<br>Па |                                                                    |                                                                  |
| 1                                  | 2                                    | 3               | 4                    | 5                                      | 6                                                        | 7                                               | 8                                  | 9                                                                  | 10                                                               |
| ВЦ4-75                             | 1                                    | АИР56В2         | 0,55                 | 3000                                   | 2730                                                     | 0,77-1,2                                        | 265-<br>160                        | 9,5                                                                | 76                                                               |

6. **Датчик тока**– марки *Honeywell CSNB131*. Датчик тока проводит измерения значений постоянного и переменного тока с гальванической развязкой силовой цепи и цепей контроля.

7. **Блок твердотельных реле** – реле *FOTEK SSR-25DA*, представленный на рисунке 1.5



Рисунок 1.5 – Блок твердотельных реле

8. **Программируемый логический контроллер** - ПЛК *FX3G MitsubishiElectric* [21] представлен на рисунке 1.6. В качестве верхнего уровня управления применена *SCADA TRACE MODE*. Многооконный интерфейс системы позволил, как представить мнемосхему технологического процесса совместно с узлами контроля и управления, так и сформировать тренды процедуры управления экспериментальной установки. Мнемосхема представлена на рисунке 1.7.



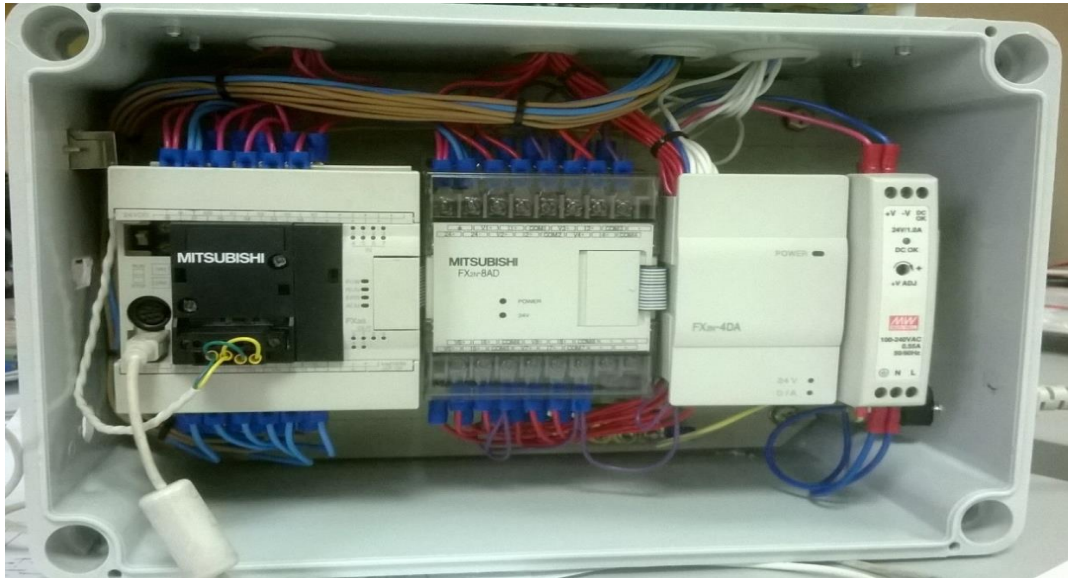


Рисунок 1.6 – Программируемый логический контроллер FX3G  
*MitsubishiElectric*

Пример визуализации регулировочной характеристики, снятой на экспериментальном стенде представлен на рисунке 1.8.

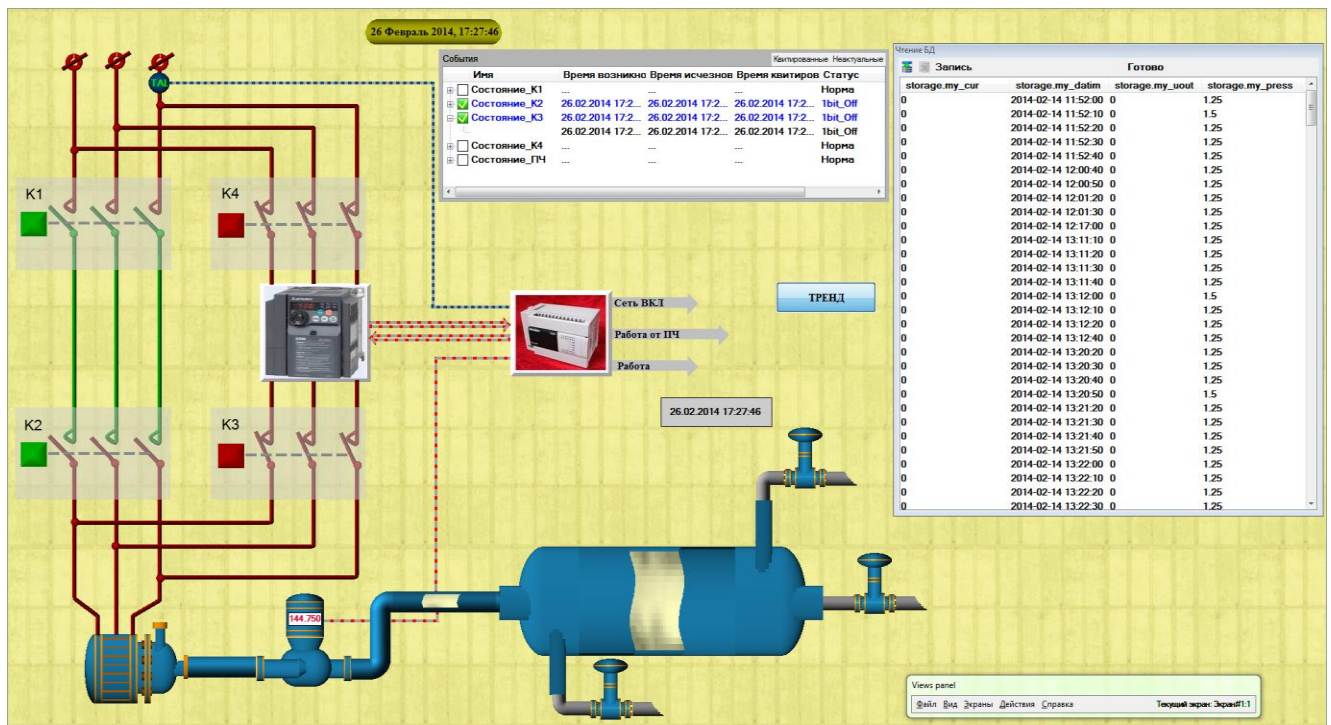


Рисунок 1.7– Мнемосхема технологического процесса в вентиляционной  
установке

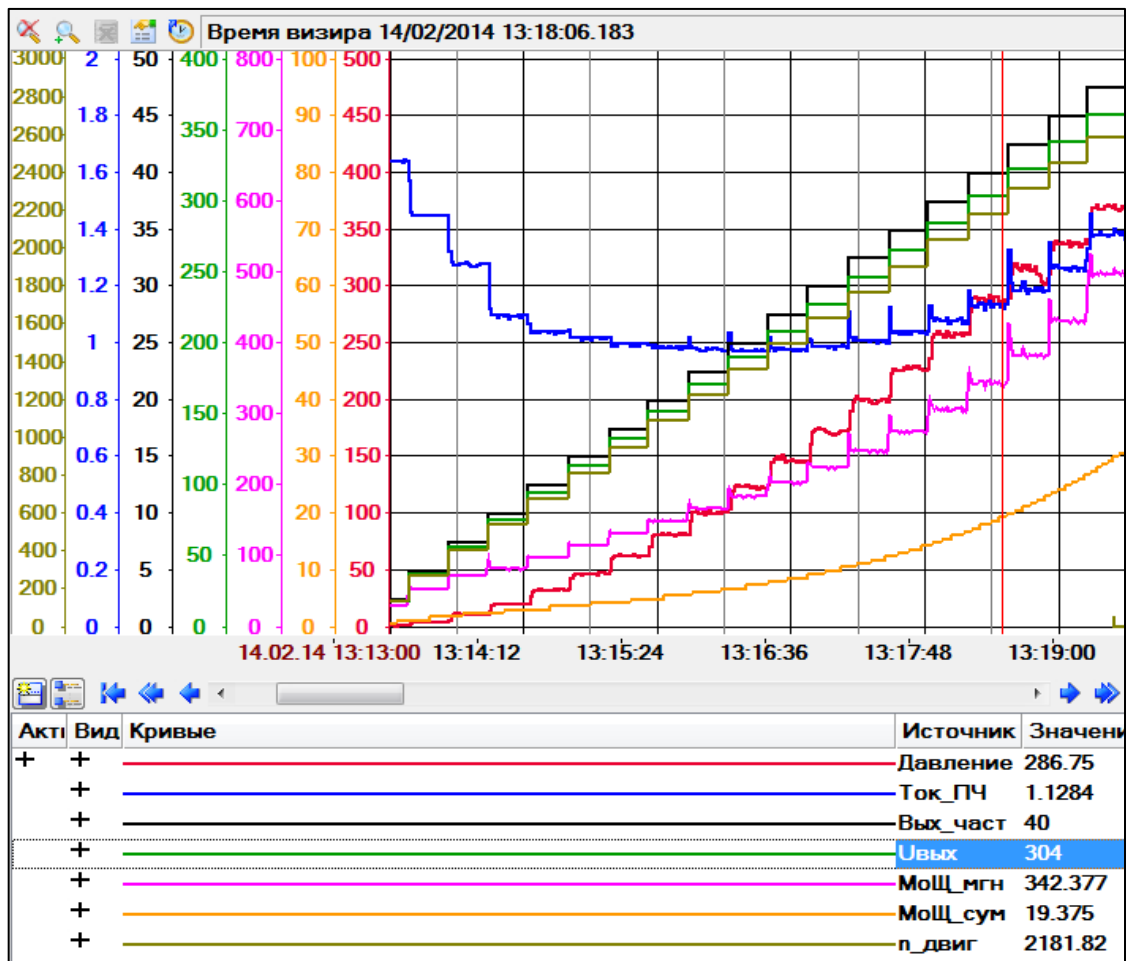


Рисунок 1.8 –Характеристики работы установки

Полученные в эксперименте значения приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 –Экспериментальные значения

| Ток частотного преобразователя<br>$I, A$ | Давление в системе,<br>$P, Pa$ | Частота,<br>$f, Гц$ | Напряжение на выходе.<br>$U_{вых}, B$ | Мощность,<br>$P_{вых}, (Bт)$ | Частота вращения вала, $n$ ,<br>об/мин | Скорость воздушного потока, $V$ ,<br>м/с |
|------------------------------------------|--------------------------------|---------------------|---------------------------------------|------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------|
| 1,64                                     | 1,25                           | 2,5                 | 19                                    | 31,2                         | 136,4                                  | 0,7                                      |
| 1,45                                     | 5                              | 5                   | 38                                    | 55,1                         | 272,8                                  | 0,9                                      |
| 1,28                                     | 11,25                          | 7,5                 | 57                                    | 73                           | 409,1                                  | 2,5                                      |
| 1,10                                     | 20,5                           | 10                  | 76                                    | 83,6                         | 545,5                                  | 3,7                                      |
| 1,04                                     | 32,25                          | 12,5                | 95                                    | 98,8                         | 681,9                                  | 5,1                                      |
| 1,02                                     | 47,25                          | 15                  | 114                                   | 116,3                        | 818,2                                  | 6,7                                      |
| 1,00                                     | 63,5                           | 17,5                | 133                                   | 132,8                        | 954,5                                  | 8,2                                      |

|      |        |      |     |        |        |      |
|------|--------|------|-----|--------|--------|------|
| 0,93 | 82,5   | 20   | 152 | 150,6  | 1090,9 | 9,6  |
| 0,98 | 103    | 22,5 | 171 | 167,8  | 1227,3 | 10,5 |
| 0,98 | 125,5  | 25   | 190 | 185,1  | 1363,4 | 11,9 |
| 0,98 | 145,8  | 27,5 | 209 | 204,9  | 1500   | 14   |
| 0,98 | 171,5  | 30   | 228 | 224,2  | 1636,4 | 15,2 |
| 1,00 | 198,79 | 32,5 | 247 | 248,6  | 1772,7 | 16,3 |
| 1,03 | 228,5  | 35   | 266 | 274,2  | 1909,1 | 17,5 |
| 1,07 | 259    | 37,5 | 285 | 307,8  | 2045,5 | 19   |
| 1,14 | 288    | 40   | 304 | 346,1  | 2181,8 | 20,3 |
| 1,19 | 314,3  | 42,5 | 323 | 383,13 | 2318,2 | 21   |
| 1,26 | 337,8  | 45   | 342 | 431,9  | 2454,6 | 22   |
| 1,38 | 370,3  | 47,5 | 361 | 498,5  | 2590,9 | 23,2 |
| 1,50 | 399,3  | 50   | 380 | 568,2  | 2727,3 | 24,5 |

Исходя из полученных в эксперименте данных, считая, что график нагрузки представлен на рисунке 1.9, производится сравнение различных способов регулирования электрической нагрузки.

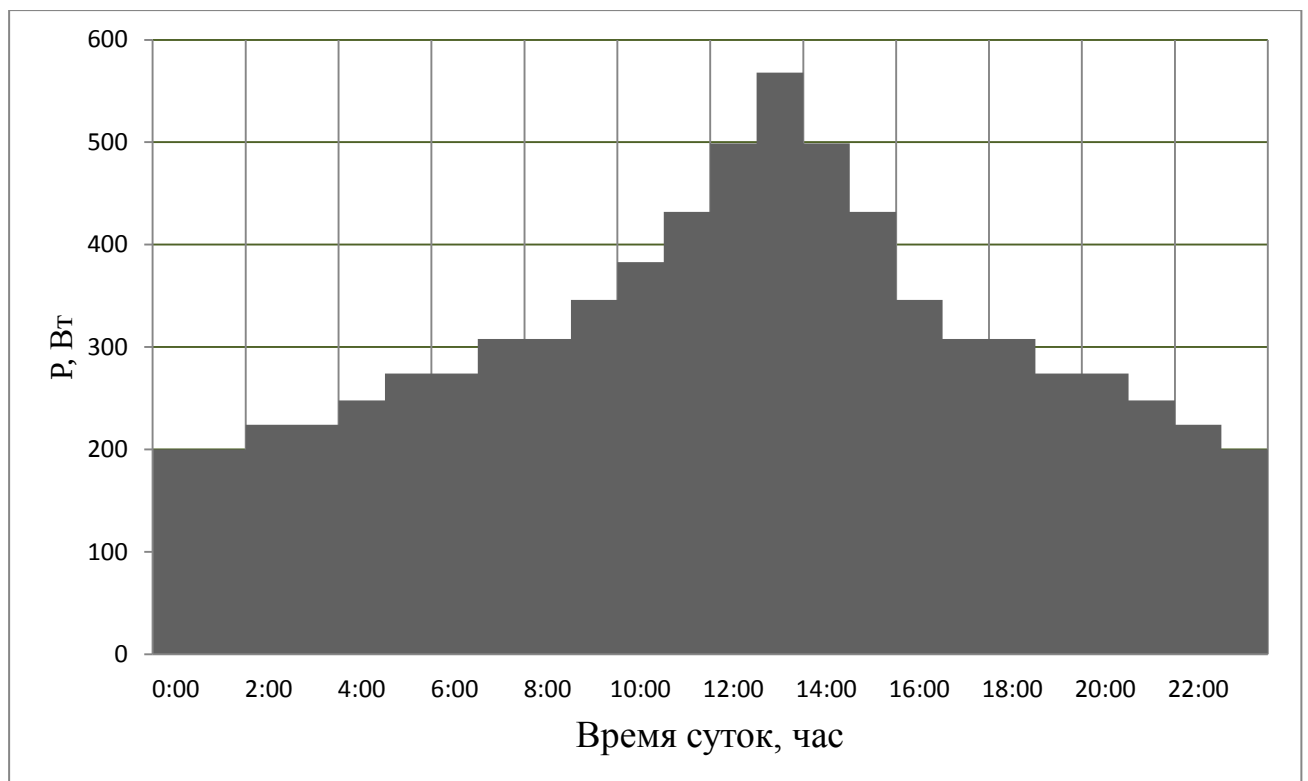


Рисунок 1.9 – График электрической нагрузки

Так как выходные характеристики и мощность вентилятора известны, то достаточность экспериментальных данных позволяет отказаться от аналитических выражений, а оценка эффективности установки может быть определена на основании полученных экспериментальных данных. Поэтому для данного графика нагрузки по полученным экспериментальным графикам давления и мощности, представленных на рисунке 1.8 и в таблице 1.3, для каждого часа суток при известном значении мощности можно определить уровень давления в системе и расход ЭЭ для каждого часа. Например, для 01:00 часа мощность составляет 200 Вт, по характеристикам, представленным на рисунке 1.8. и таблице 1.3. соответствующее давление составляет 142,31 Па и уровень потребленной ЭЭ составит 200 кВт\*ч.

Результаты представлены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Расчетные значения для графика нагрузки

| Час   | Мощность, Вт | Давление, Па | Потребляемая ЭЭ,<br>кВт*ч |
|-------|--------------|--------------|---------------------------|
| 00:00 | 200          | 142,31       | 200                       |
| 01:00 | 200          | 142,31       | 200                       |
| 02:00 | 224          | 171,35       | 224                       |
| 03:00 | 224          | 171,35       | 224                       |
| 04:00 | 248          | 198,31       | 248                       |
| 05:00 | 274          | 228,33       | 274                       |
| 06:00 | 274          | 228,33       | 274                       |
| 07:00 | 308          | 259,17       | 308                       |
| 08:00 | 308          | 259,17       | 308                       |
| 09:00 | 346          | 287,92       | 346                       |
| 10:00 | 383          | 314,19       | 383                       |
| 11:00 | 432          | 337,88       | 432                       |
| 12:00 | 499          | 370,67       | 499                       |
| 13:00 | 568          | 399,06       | 568                       |
| 14:00 | 499          | 370,67       | 499                       |
| 15:00 | 432          | 337,88       | 432                       |
| 16:00 | 346          | 287,92       | 346                       |

|              |     |        |         |
|--------------|-----|--------|---------|
| 17:00        | 308 | 259,17 | 308     |
| 18:00        | 308 | 259,17 | 308     |
| 19:00        | 274 | 228,33 | 274     |
| 20:00        | 274 | 228,33 | 274     |
| 21:00        | 248 | 198,31 | 248     |
| 22:00        | 224 | 171,35 | 224     |
| 23:00        | 200 | 142,31 | 200     |
| <b>Итого</b> |     |        | 7601 Вт |

Данная таблица представляет собой результат регулирования нагрузки с использованием ЧРП.

В реальных пневмо-системах находит широкое применение регулирование воздушного потока дросселированием пневмо-задвижки. В таких случаях будет отсутствовать регулирование нагрузки и давления в системе. Следовательно, будет присутствовать перерасход электроэнергии в системе в связи с тем, что двигатель будет работать с целью поддержания заданного давления. В таких случаях потребление сети будет меньше производительности вентилятора низкого давления, воздух или газ закачивается в трубы, но не выходит из них и давление начинает расти. Следовательно, переизбыток давления можно исключить путем сброса газа или воздуха в атмосферу. Данный способ самый простой и неэкономичный, так как воздух или газ, на сжатие которого расходуется электроэнергия, неэффективно сбрасывается в атмосферу.

Если пневмозадвижка настроена так, что в системе постоянно поддерживается давление в 400,0 Па, несмотря на то, что для каждого часа работы электродвигателя требуется свое значение давления в соответствии с графиком электрической нагрузки на рисунке 1.9. В таком случае в системе будет поддерживаться нагрузка в размере 568,2 Вт в час и расход электроэнергии за сутки составит в среднем 13 632 Вт – а перерасход по сравнению с первым вариантом составит – 6 031 Вт.

В процентном отношении перерасход ЭЭ составит 79%. Данный процент экономии рассчитан без учета дополнительного расхода электроэнергии на ЧРП. В реальном случае данная экономия уменьшится примерно до 60%.

Таким образом, на основании полученных результатов, можно сделать следующие выводы:

- Изложенные тенденции построения энергоэффективных приводов агрегатов являются отражением мирового опыта, зарекомендовали себя на практике. По приведенным в литературе оценкам применение частотного регулирования позволяет снизить расход потребления электроэнергии от 30 до 40%, по некоторым данным до 60% [22].
- 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 соответствии с теорией подобия выводы об эффективности управления пневмоустановкой могут быть распространены и на гидроустановки (насосы).

## **ГЛАВА 2. Анализ ситуации на розничном рынке электроэнергии и мощности**

Для объектов водоснабжения около 90% потребляемой электроэнергии приходится на работу насосного оборудования. При этом расходы ЭЭ на подъем и подачу воды в город для таких объектов могут достигать до 2 миллионов кВт\*ч в месяц.

Следовательно, для потребителей, реализующих услуги водоснабжения, встает вопрос о снижении объемов потребляемых энергоресурсов согласно требованиям федерального закона от 23.11.2009 №261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты РФ».

Кроме того, на розничных рынках электроэнергии наблюдается постоянный рост цен на энергоносители, что вынуждает потребителя искать возможные пути снижения затрат на приобретение ЭЭ на подъем и транспортировку воды.

Решением вопроса повышение энергетической эффективности на объектах водоснабжения могут стать организационно-технические мероприятия и мероприятия, направленные на внедрение энергосберегающих технологий.

Одним из организационно-технических мероприятий выступает выбор наиболее оптимального тарифа (ценовой категории) для потребителя электрической энергии (мощности). 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 (ЦК) [23].

Острая проблема выбора ЦК стоит на данный момент перед потребителями с максимальной мощностью более 670 кВт, для которых с 1 июля

2013 г. допустим выбор лишь ЦК с почасовым учетом, либо ЦК с почасовым учетом и планированием[23].

Теперь такие потребители имеют право выбора нижеперечисленных ЦК:

- третья ЦК – для потребителей ЭЭ и мощности, энергопринимающие устройства которых оборудованы приборами учета, которые позволяют измерять почасовые значения объемов потребления электрической энергии, при выборе котлового тарифа в одноставочном исполнении;
- четвертая ЦК – для потребителей ЭЭ и мощности, энергопринимающие устройства которых оборудованы приборами учета, которые позволяют измерять почасовые значения объемов потребления электрической энергии, при выборе котлового тарифа в двухставочном исполнении;
- пятая ЦК – для потребителей ЭЭ и мощности, энергопринимающие устройства которых оборудованы приборами учета, которые позволяют измерять почасовые значения объемов потребления электрической энергии, при выборе котлового тарифа в одноставочном исполнении и при согласии выполнения условий планирования объемов потребления ЭЭ по часам суток;
- шестая ЦК – для потребителей ЭЭ и мощности, энергопринимающие устройства которых оборудованы приборами учета, которые позволяют измерять почасовые значения объемов потребления электрической энергии, при выборе котлового тарифа в двухставочном исполнении и при согласии выполнения условий планирования объемов потребления ЭЭ по часам суток [23].

Выбор ЦК должен быть осуществлен исходя из минимума затрат на приобретение электрической энергии, что в свою очередь зависит от графика нагрузки и его пиковой мощности. В особенности на выбор ЦК влияют такие факторы, как степень равномерности графика нагрузки, наличие или отсутствие



значительных пиков потребления электроэнергии, готовность потребителя отслеживать величину сетевой составляющей мощности, которая может быть весьма значительна для некоторых технологических процессов, а также готовность осуществлять планирование почасовых объемов на сутки вперед.

Для 5 и 6 ЦК формируются самые низкие значения нерегулируемой цены, но при выборе данных ЦК потребитель обязан предоставить гарантирующему поставщику (ГП) плановые значения потребления электроэнергии на месяц вперед с почасовой разбивкой. При этом потребителю в конечный тариф включают стоимость отклонения планового потребления ЭЭ от фактического значения, и величина таких отклонений может быть очень высока.

Поэтому для объектов водоснабжения, которые приобретают электрическую энергию по 5 или 6 ЦК, встает вопрос о грамотном прогнозировании расходов электрической энергии, так как суммарные затраты на приобретение ЭЭ и мощности по данным ЦК включают в себя также стоимость отклонения полученного прогнозного потребления от фактического потребления.

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. Известно, что замена регулирования задвижкой на управление с использованием частотного привода электрической нагрузки позволит достигнуть экономии электроэнергии в аналогичных системах до 60 %[4]. Однако подобные результаты отражают уровень технологического процесса, но не соответствуют уровню производства.

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

параметров, нацелено в первую очередь на снижение уровня потребления ЭЭ, улучшение качества ЭЭ и непосредственно надежности производства.

Прогноз и планирование потребления ЭЭ становится в таком случае элементом планово-финансового управления производством и позволяет оценить не только возможную экономию денежных средств на приобретение ЭЭ, но и грамотно выстраивать технологические режимы работы оборудования [24]. В связи с этим практическая ценность внедрения прогнозных аппаратов на производство значительно возросла и наряду с этим возросли требования к качеству прогнозных исследований, следовательно, возникла необходимость в подробном изучении и совершенствовании существующих методов прогнозирования.

Методы и алгоритмы прогнозирования потребления ЭЭ должны обеспечивать:

- возможность создания архива данных по потреблению ЭЭ и в дальнейшем осуществлять его использование при получении прогноза на будущие периоды времени;
- возможность выполнения как однофакторного, так и многофакторного прогнозирования с учетом влияющих факторов;
- высокую точность полученного прогноза;
- адаптированность к данным графика электрической нагрузки;
- возможность проведения статистического анализа данных потребления ЭЭ и выполнения оценки режимов работы энергетического оборудования;
- необходимую точность расчетов по прогнозированию потребления ЭЭ;
- возможность работы прогнозного аппарата в условиях функционирования производственных процессов с загрузкой данных в режиме *online* из комплексов автоматизированных систем учета и возможность учитывать параметры балансирующего рынка;

- обмен данными и результатами прогноза между узлами управления и объектами технологической схемы [25].

На основании этого модель прогноза должна отвечать таким основным требованиям, как точность, адаптивность к графику электрической нагрузки, универсальность, которая заключается в возможности получения прогноза для различных временных интервалов [26].

Таким образом, на сегодняшний день существует достаточно широкий круг обзора отечественной и зарубежной литературы, которая посвящена прогнозированию ЭЭ. Прежде всего, такие литературные источники дают обзор существующих методов прогноза и оценивают возможность их применения для получения точных прогнозов потребления электроэнергии.

С целью осуществления прогнозирования потребления ЭЭ объектом водоснабжения необходимо провести подробный анализ имеющихся данных потребления электрической энергии объекта водоснабжения и выполнить проверку гипотезы прогноза.

### ГЛАВА 3. Анализ исходных данных и проверка гипотезы прогноза

Проблемами изучения изменения электрических нагрузок во времени и их прогнозирования посвящено большое количество работ отечественных и зарубежных авторов, например [27-36].

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.

Процессы потребления ЭЭ на производстве включают в себя циклические, функциональные закономерности и случайные тенденции. Наибольшая точность достигается при получении прогноза циклических зависимостей на сутки, неделю, год. Исходя из циклических зависимостей формируется до 70-80% значений графика электрической нагрузки. Для объекта водоснабжения одними из наиболее существенных циклических факторов является время суток, день недели, в зависимости от которых меняются циклы потребления воды населением и промышленными предприятиями.

Закономерности функционального характера формируют 10-15 % всех значений графика электрической нагрузки. К таким закономерностям для объекта водоснабжения относят давление, напор в системе водоснабжения, объем подачи воды.

Доля участия тенденций случайного характера при формировании графика электрической нагрузки невелико, однако амплитуда таких воздействий может быть довольно значительна и внести значительные отклонения при формировании прогноза потребления ЭЭ. Сложность учета таких случайных тенденций заключается в том, что аварийные ситуации на производстве учесть заранее не представляется возможным, и, поэтому при формировании прогноза на будущие периоды времени необходимо учитывать вероятностные характеристики таких

событий либо исключать данные периоды из исходных данных при построении прогноза.

Модель сигнала можно представить в виде следующей формулы (3.1):

$$s(t)=f(t)+\sigma \cdot e(t) \quad (3.1)$$

где  $s(t)$  – исследуемый сигнал;

$f(t)$  – базовые значения сигнала;

$e(t)$  – шумовая компонента;

$\sigma$  – уровень шума.

Предполагается, что функция  $e(t)$  представляет собой модель белого шума, и случайные составляющие высокой амплитуды информация находятся в спектре сигнала высокой частоты, а базовые значения сигнала – в областях низких частот [37].

С целью подготовки данных для прогнозирования может быть использован метод вейвлет-анализа, который характеризуется высокой эффективностью для анализа и подготовки данных, и находит свое применение в различных сферах, где требуется качественный подход к обработке данных [38,39]. В случае прогнозирования графика электрической нагрузки он позволит исключить нетипичные явления в изменении значений потребления ЭЭ.

Вейвлет-преобразование было впервые предложено в начале 90-х годов прошлого века и в последующее время нашло достаточно широкий круг применения. Первые работы по теоретическим основам вейвлет-преобразования были опубликованы такими авторами, как Хааром А., Майером Дж., Добеши И. и Маллатом С. Основы теории и возможности использования вейвлетов для прогноза временных рядов представлены в работах отечественных и зарубежных авторов, таких как Yao S.J., Song Y.H., Zhang L.Z., Cheng X.Y.[40], Смоленцев Н.К, Яковлев А.Н., К. Блаттер, Добеши И [37], Mallat S.[41], Воробьев В.И., Грибунин В.Г [42].

Вейвлет-преобразование заключается в выделении особенностей сигнала (исходного ряда данных) для каждой точки частотно-временной плоскости.

Удаление случайных тенденций при помощи вейвлет-преобразования выполняется в четыре этапа:

1. Выполняется разложение графика электрической нагрузки по вейвлет-базису.
2. Определяется пороговое значение «зашумлённости» для каждого уровня разложения аппроксимирующих и детализирующих коэффициентов.
3. Проводится фильтрация коэффициентов детализации по пороговым значениям.
4. Выполняется восстановления сигнала с учетом проведенной пороговой фильтрации [37].

На рисунке 3.1 представлен типовой график нагрузки объекта водоснабжения, а именно насосной станции третьего подъема (НС 3-го подъема). График нагрузки любого предприятия характеризуется своими уникальными особенностями и режимами работы оборудования, например, данный график нагрузки, имеет две основные составляющие, обеспечивающие основной технологический процесс:

- работа насосных агрегатов;
- отопление, освещение.

По внешнему виду графика нагрузки можно сделать вывод, что присутствует некоторая зашумленность, от которой предстоит избавиться.

На первом этапе вейвлет-анализа выполняется разложение графика электрической нагрузки на аппроксимирующие и детализирующие коэффициенты с помощью вейвлета Хаара, который группирует элементы входного сигнала для каждого уровня разложения.

Величина глубины разложения данных влияет на уровень вычитания случайной (шумовой) компоненты и в итоге приводит к «переукрупнению» масштаба полученных зависимостей и искажает форму графика электрической нагрузки [43].

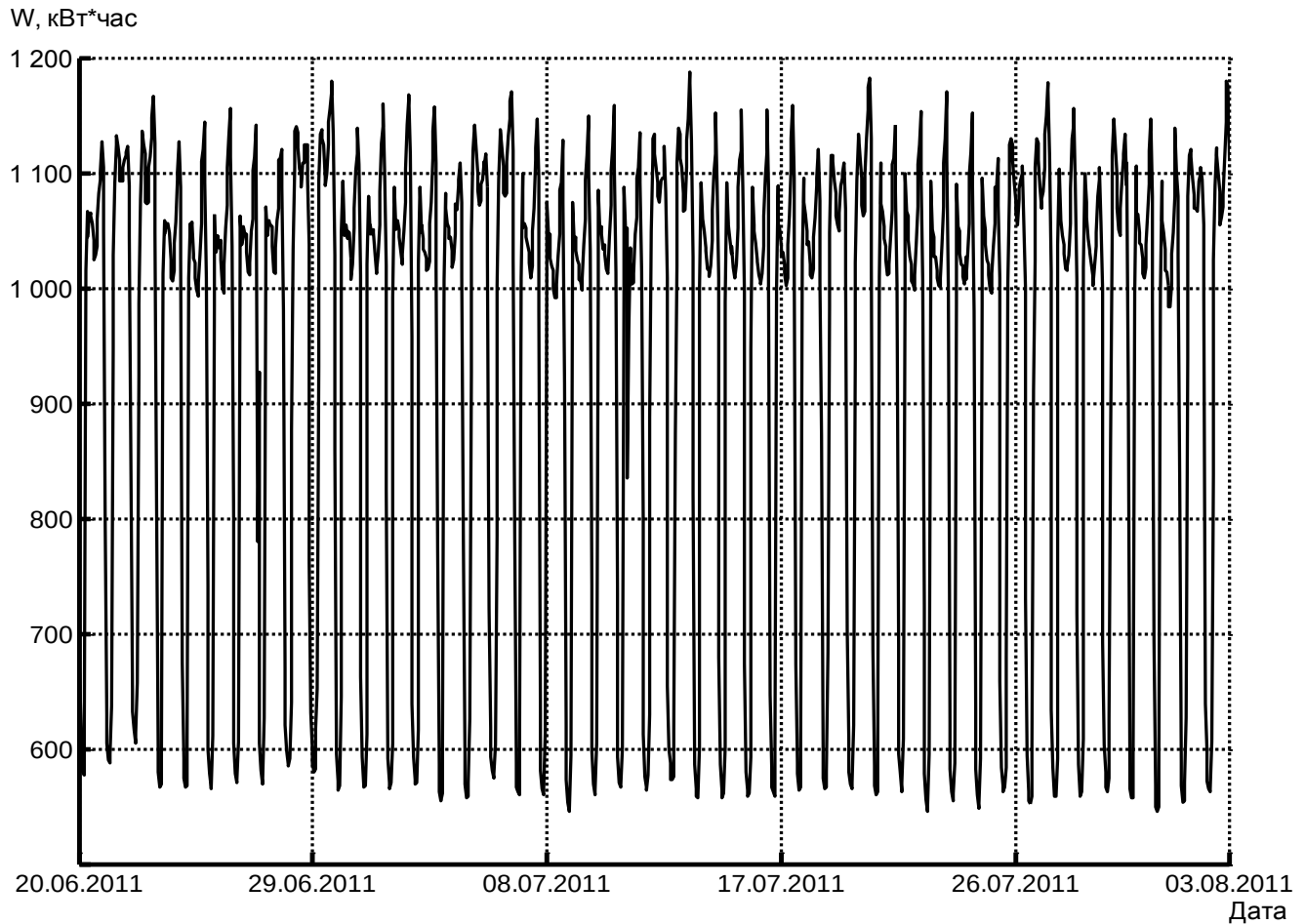


Рисунок 3.1 – Недельный график нагрузки насосной станции 3-го подъема

С целью исключения данных особенностей вейвлет-преобразования, разложение временного ряда осуществляется с глубиной равной трем.

На рисунке 3.2 представлен результат разложения исходного ряда на аппроксимирующие и детализирующие составляющие.

Удаление шума заключается в исключении высокочастотных составляющих из исходного ряда данных. В вейвлет-преобразовании это реализуется за счет удаления детализирующих коэффициентов высокочастотных уровней, в которых входят значения случайных тенденций высокой амплитуды. Случайные тенденции исходного ряда данных и шумовые компоненты в вейвлет-преобразовании рассматриваются как большое количество локальных особенностей графика электрической нагрузки. При заданном уровне пороговой

обработки производится срез детализирующих коэффициентов, уменьшая амплитуду воздействия случайных тенденций на график электрической нагрузки.

Таким образом, производится очистки сигналов от шума в зависимости от параметров графика электрической нагрузки [44].

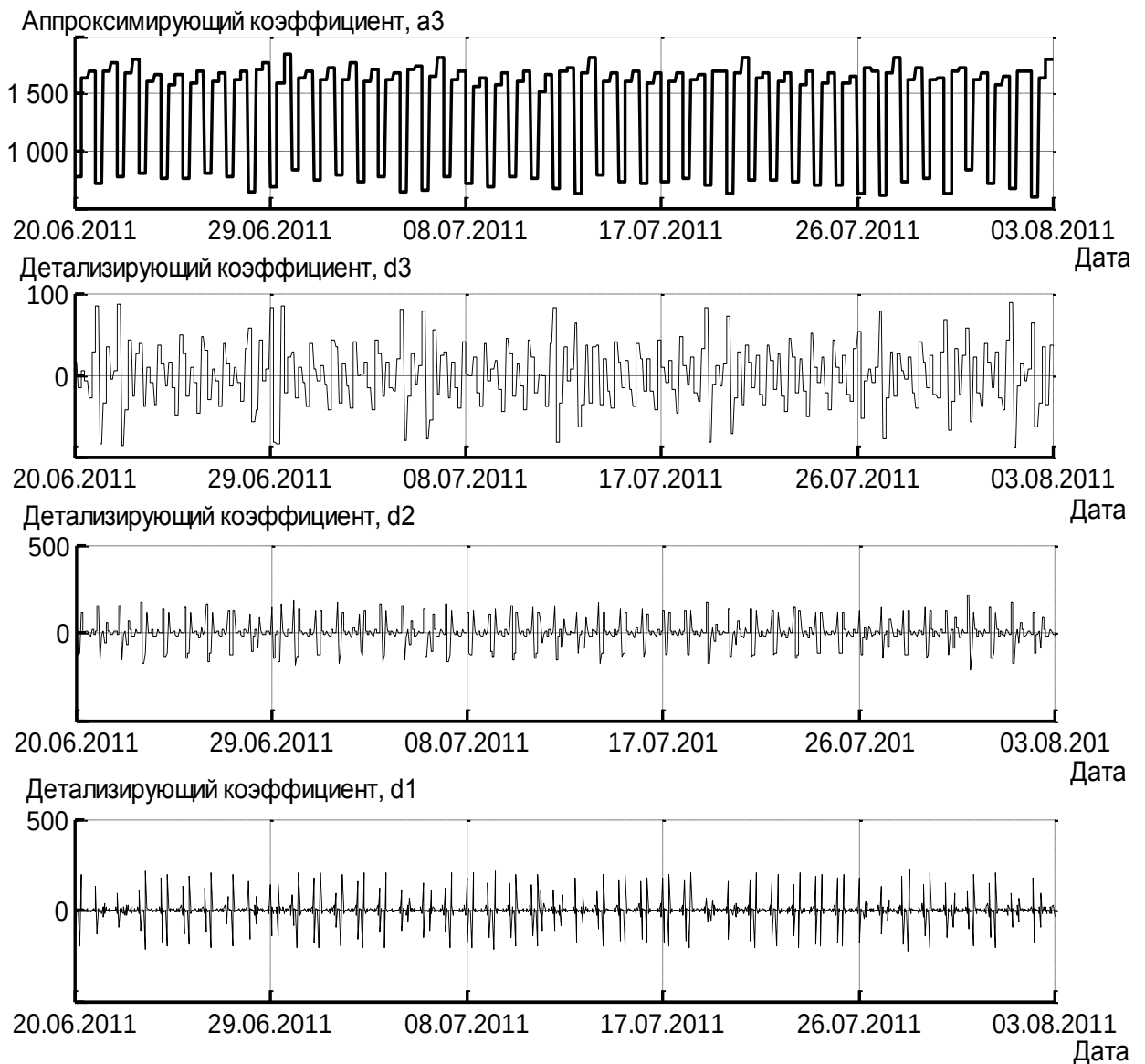


Рисунок 3.2 – Разложение исходного сигнала на аппроксимирующие и детализирующие коэффициенты

В качестве значения порога шума применяется критерий, минимизирующий квадратичную функцию потерь для выбранной модели. Пороговые уровни очистки характеризуются гибкостью – каждому номеру уровня



разложения соответствует определенное значения порогового уровня шума. На рисунке 3.3 представлены значения остатков, которые для условий очистки, уставленных для данного вейвлет-преобразования, представляют собой разницу между исходными коэффициентами и модифицированными коэффициентами детализации вейвлет-разложения.

Заключительным этапом вейвлет-преобразования является реконструкция сигнала по аппроксимирующим и модифицированным детализирующим коэффициентам. На рисунке 3.4 представлен график нагрузки после восстановления по аппроксимирующим и детализирующим коэффициентам.

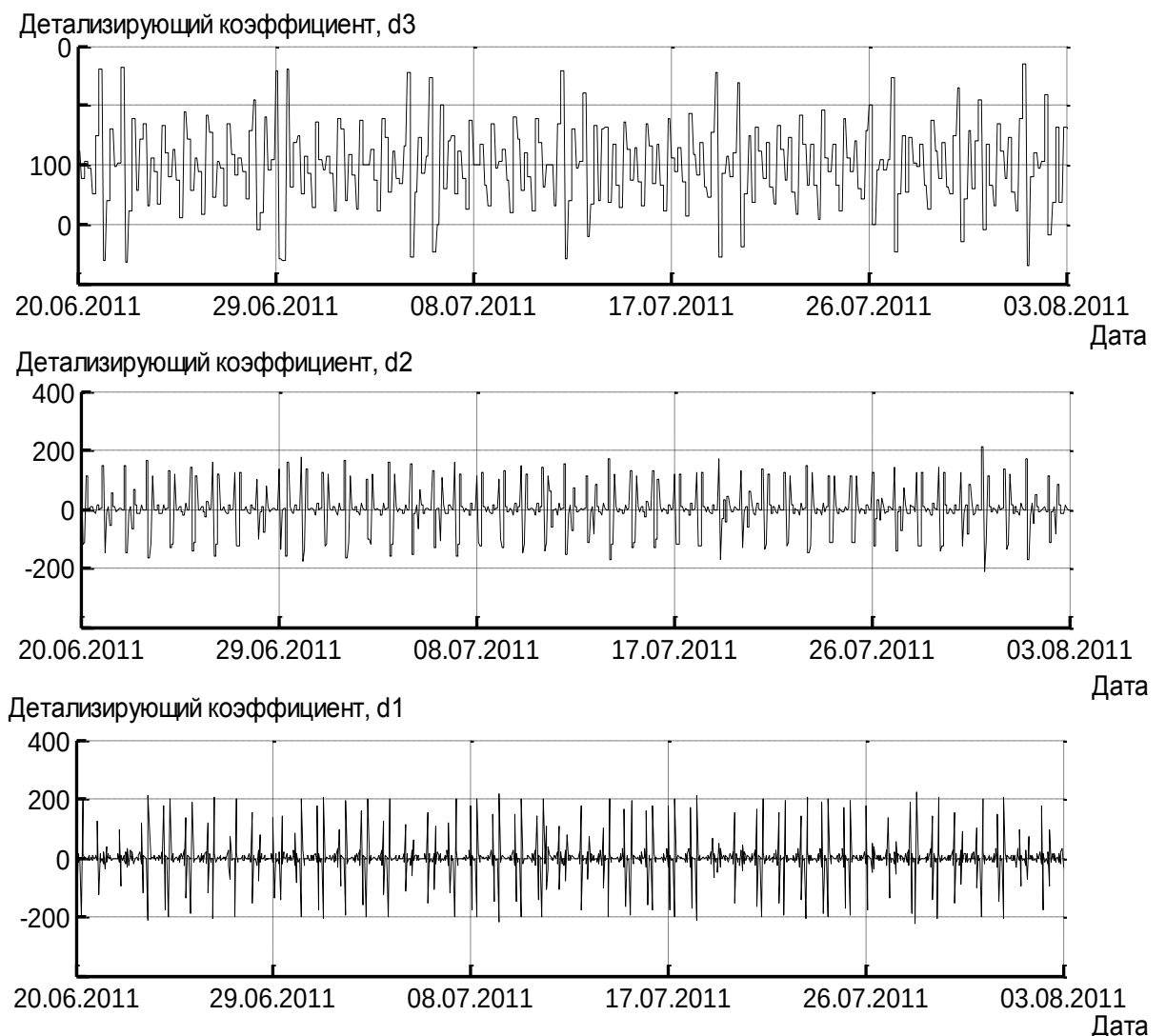


Рисунок 3.3 – Модифицированные детализирующие коэффициенты вейвлет-разложения

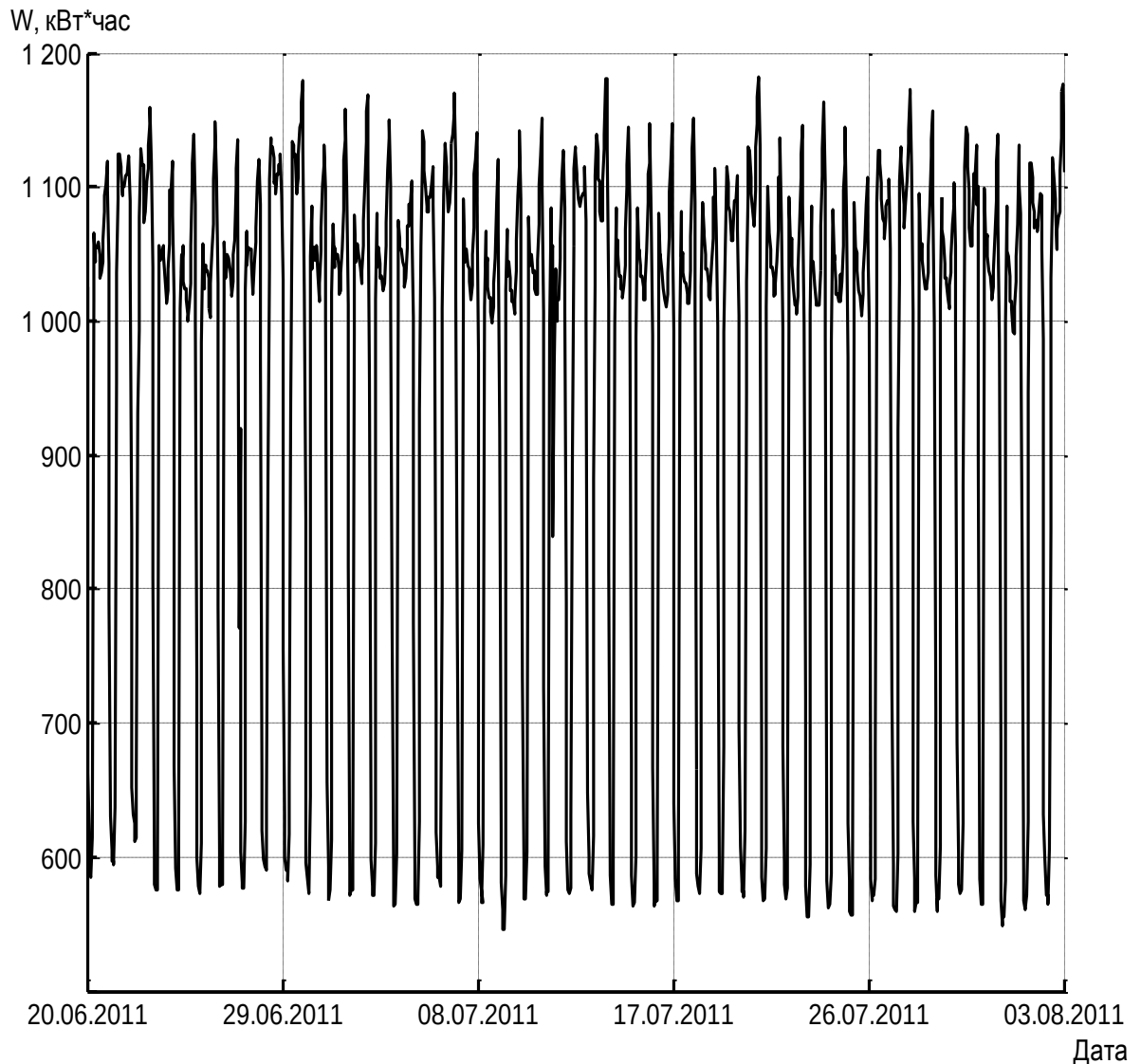


Рисунок 3.4 – Реконструированный недельный график нагрузки насосной станции 3-го подъема

В качестве основного условия для построения прогноза является анализ исходного ряда на наличие статистической связи между переменными. Для этого выдвигают нулевую гипотезу об отсутствии взаимосвязи или корреляции между исследуемыми переменными. Существует несколько тестов на наличие автокорреляций. Например, тест Дарбина-Уотсона, который определяет наличие автокорреляций между соседними членами.

Но данный метод не выделяет область критических значений, при которых выполнялось бы опровержение гипотезы об отсутствии зависимостей между исследуемыми значениями при попадании в данную область

наблюдаемого значения статистики. Таким образом, можно говорить о том, что при использовании данного метода имеются зоны неопределенности.

Кроме того, тест характеризуется ограниченностью результата, т.к. в результате выявляется лишь корреляция между соседними членами [45].

На основании вышеизложенного, в качестве проверки гипотезы применяется Q-тест Льюинга-Бокса, который использует статистический критерий для нахождения автокорреляции временных рядов. Преимущество использования данного метода заключается в том, что вместо тестирования на случайность каждого отдельного автокорреляционного коэффициента, он выполняет проверку на отличие от нуля одновременно несколько коэффициентов автокорреляции.

Проведение Q-теста Льюинга — Бокса заключается в выдвижении двух конкурирующих гипотез:

$H_0$ : данные являются случайными.

$H_a$ : данные не являются случайными.

Затем проводится статистическое испытание по формуле (3.2) :

$$Q = N \cdot (N + 2) \cdot \sum_{k=1}^L \frac{r_k^2}{(N - k)}, \quad (3.2)$$

где  $n$  – число наблюдений;

$r_k$  – автокорреляция  $k$ -го порядка;

$L$  – количество проверяемых лагов наблюдений [45].

Тестирование проводится в среде *Matlab*, в результате чего получены параметры, свидетельствующие об отвержении нулевой гипотезы

Таблица 3.1 – Результаты Q-теста Льюинга-Бокса

| $H$ | $pValue$ | $Stat$ | $Critical Value$ |
|-----|----------|--------|------------------|
| 1   | 0        | 0,0816 | 0,0004           |
| 1   | 0        | 0,5427 | 0,0036           |
| 1   | 0        | 1,0543 | 0,0065           |

В таблице приведены следующие значения:  $H$  – это логический вектор решения; значение 0 означает принятие гипотезы о том, что модель подходит, 1 – отказ от нулевой гипотезы,  $pValue$  – вектор вероятностей значений тестовой статистики,  $Stat$  – вектор  $Q$ статистики для каждого отставания в лагах,  $CriticalValue$  – вектор критического значения распределения хи-квадрата по сравнению с соответствующим элементом  $stat$ .

Критическое значение меньше фактического значения статистики, следовательно, можно говорить о наличии автокорреляции.  $H=1$ , следовательно, нулевая гипотеза о том, что автокорреляция не имеет место быть, отвергается. Значение  $pValue$  характеризует вероятность ошибки отказа от нулевой гипотезы или принятия ее достоверности. В случае исследуемого графика электрической нагрузки,  $pValue$  для всех исследуемых лагов равна 0, что подтверждает отвержение нулевой гипотезы [45].

Следовательно, имеющаяся корреляция между переменными носит неслучайный, значимый характер. График нагрузки объекта водоснабжения, показанный на рисунке 3.4, характеризуется устойчивыми циклами, отчетливо видны изменения потребления ЭЭ в течение суток (утренние и вечерние максимумы и ночные минимумы нагрузки), а также в течение недели (снижение нагрузки в выходные дни за счет отсутствия потребления воды предприятиями).

Данные наблюдения подтверждаются проведенным анализом Фурье, в соответствии с рисунком 3.5.

Узкие высокие пики периодограммы свидетельствуют о наличии регулярных циклов. Имеется два ярко выраженных пика, причем второй (лаг 24) значительно выше первого (лаг 12). Это дает основание предположить возможность существования тенденции к формированию устойчивого цикла с периодом в 24 часа, что соответствует суточному циклу энергопотребления.

Анализ исходных данных показал, что уровни временного ряда отвечают требованию сопоставимости, имеют достаточное число наблюдений для выполнения прогноза. График нагрузки отражает преобладание закономерности над случайностью в изменении уровней ряда, подтверждая его устойчивость.

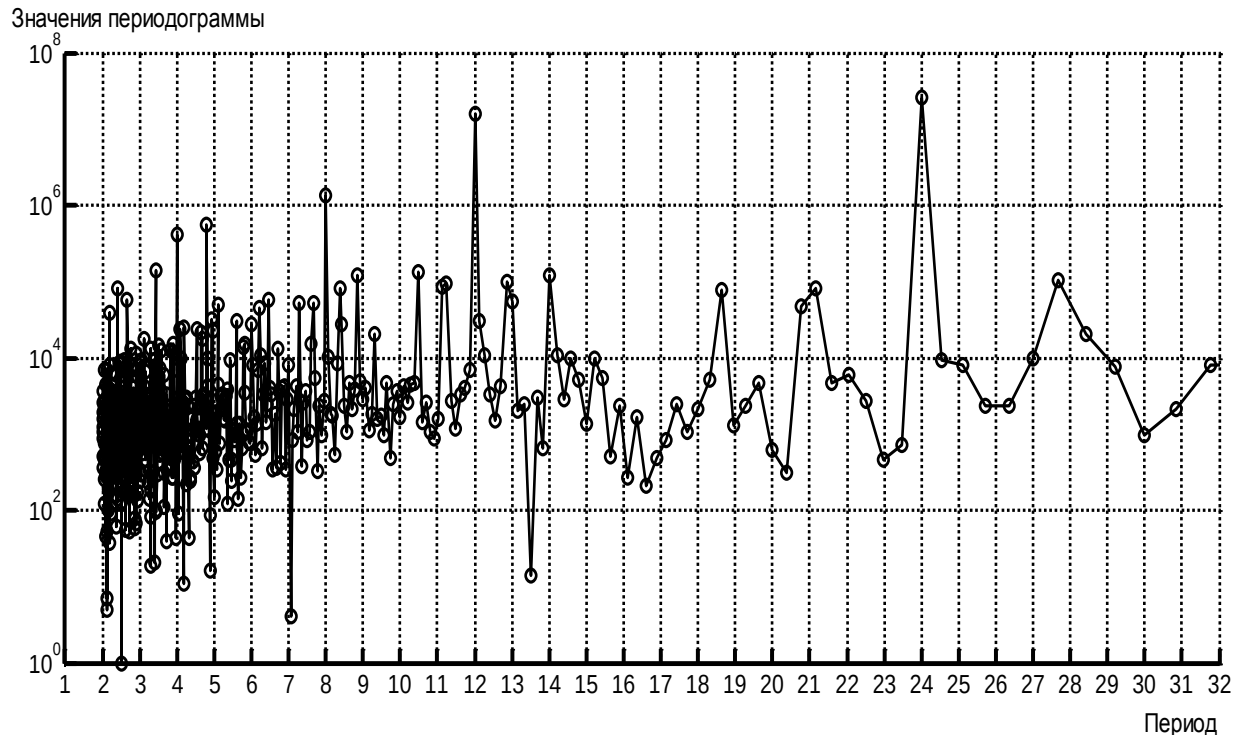


Рисунок 3.5 – Анализ Фурье графика нагрузки насосной станции 3-го подъема в логарифмическом масштабе

Временной ряд, представленный на рисунках 3.1 и 3.2, не имеет явной тенденции к возрастанию значений при увеличении номера наблюдений, т.е. монотонный тренд не наблюдается. Так как тренд не выражен ярко и отсутствуют другие особенности полученного ряда, которые указывают на нестационарность, то выполнено рассмотрение автокорреляционной функции, приведенной в соответствии с рисунком 3.6. Автокорреляционная функция имеет слабую немонотонную тенденцию затухания, что указывает на стационарность ряда.

Однородность данных подтверждает гистограмма и функция вероятности нормального распределения в соответствии с рисунком 3.7. Наблюдается отсутствие сопоставимости гистограммы и функции плотности вероятности нормального распределения, которая имеет непрерывный, равномерный вид, без смещения центра кривой относительно стандартного математического ожидания равного нулю в соответствии с рисунком 3.7а.

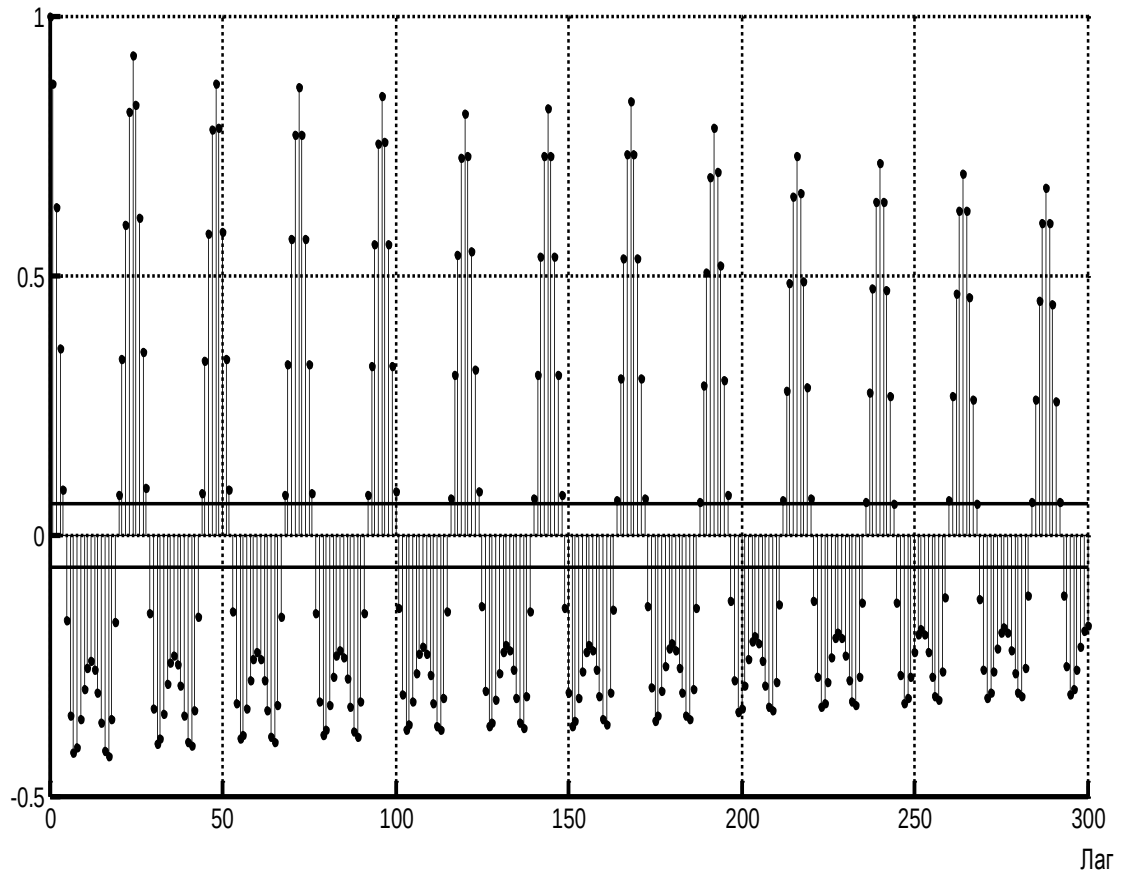


Рисунок 3.6 – Автокорреляционная функция графика нагрузки

Такие несоответствия в визуализации графиков обусловлены наличием вечернего и утреннего максимумов нагрузки (2 наибольших пика гистограммы). Об этом также свидетельствует визуализация оценки вероятности нормального распределения потребления ЭЭ согласно рисунку 3.7б. Фактические данные не совпадают и даже не располагаются вблизи линейной функции, следовательно, распределение данных не может быть охарактеризовано как нормальное, и в дальнейшем имеет смысл установить зависимости для этого ряда.

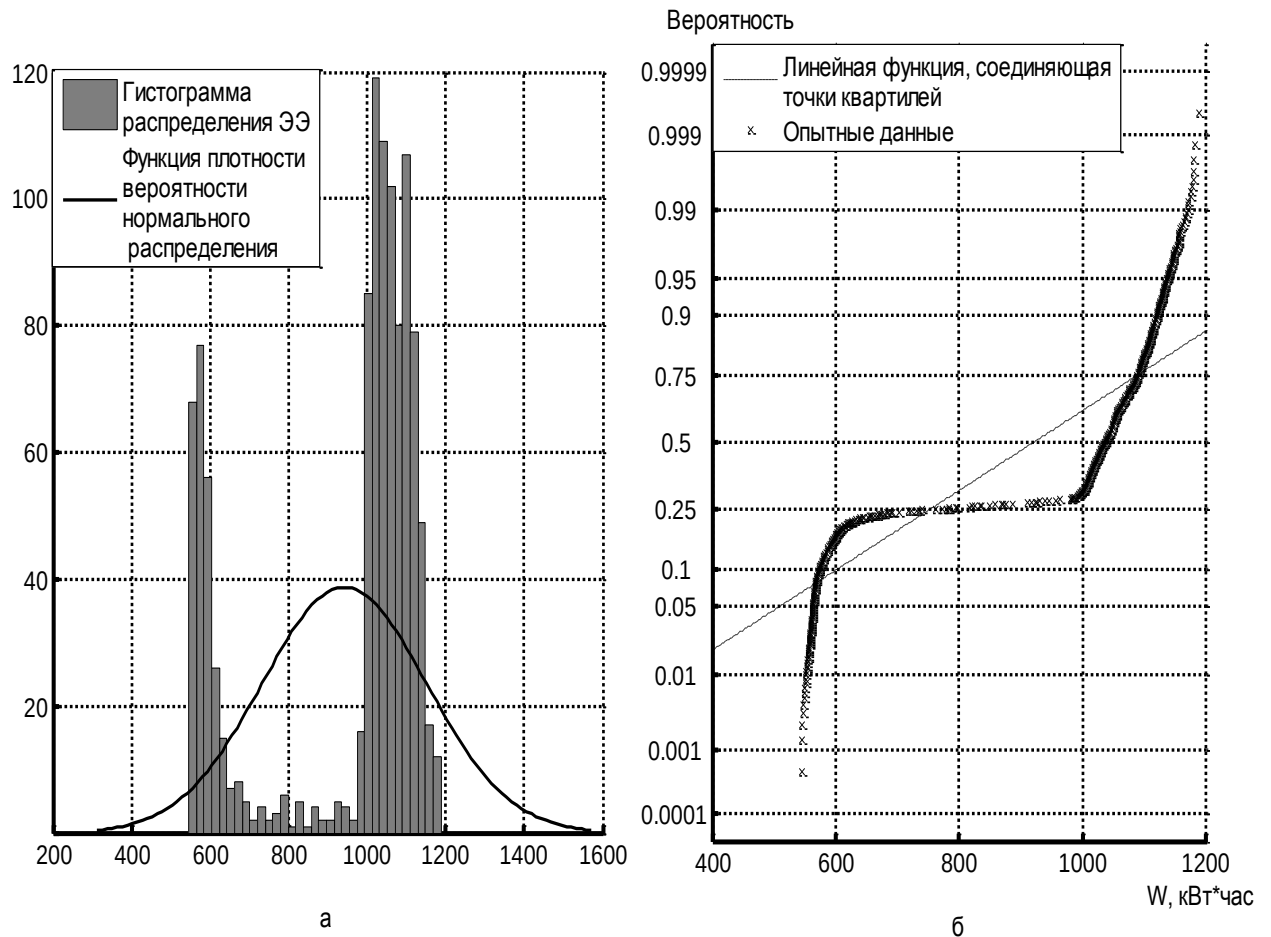


Рисунок 3.7 – Характеристики оценки нормальности распределения потребления ЭЭ: а – Гистограмма потребление ЭЭ на каждый час с нормальным законом распределения; б – вероятность нормального распределения потребления ЭЭ

Для дальнейшей работы приводят ряд к требуемому виду [45]. В качестве преобразования использована разность первого порядка (вычитается значение соответствующее суточной составляющей, лаг 12-го порядка не учитывается, т.к. в данном случае это ухудшает результат), таким образом, избавляясь от не монотонного тренда. В результате такого преобразования получены характеристики, представленный на рисунке 3.8, которые свидетельствуют о нормальном распределении уровней временного ряда [24].

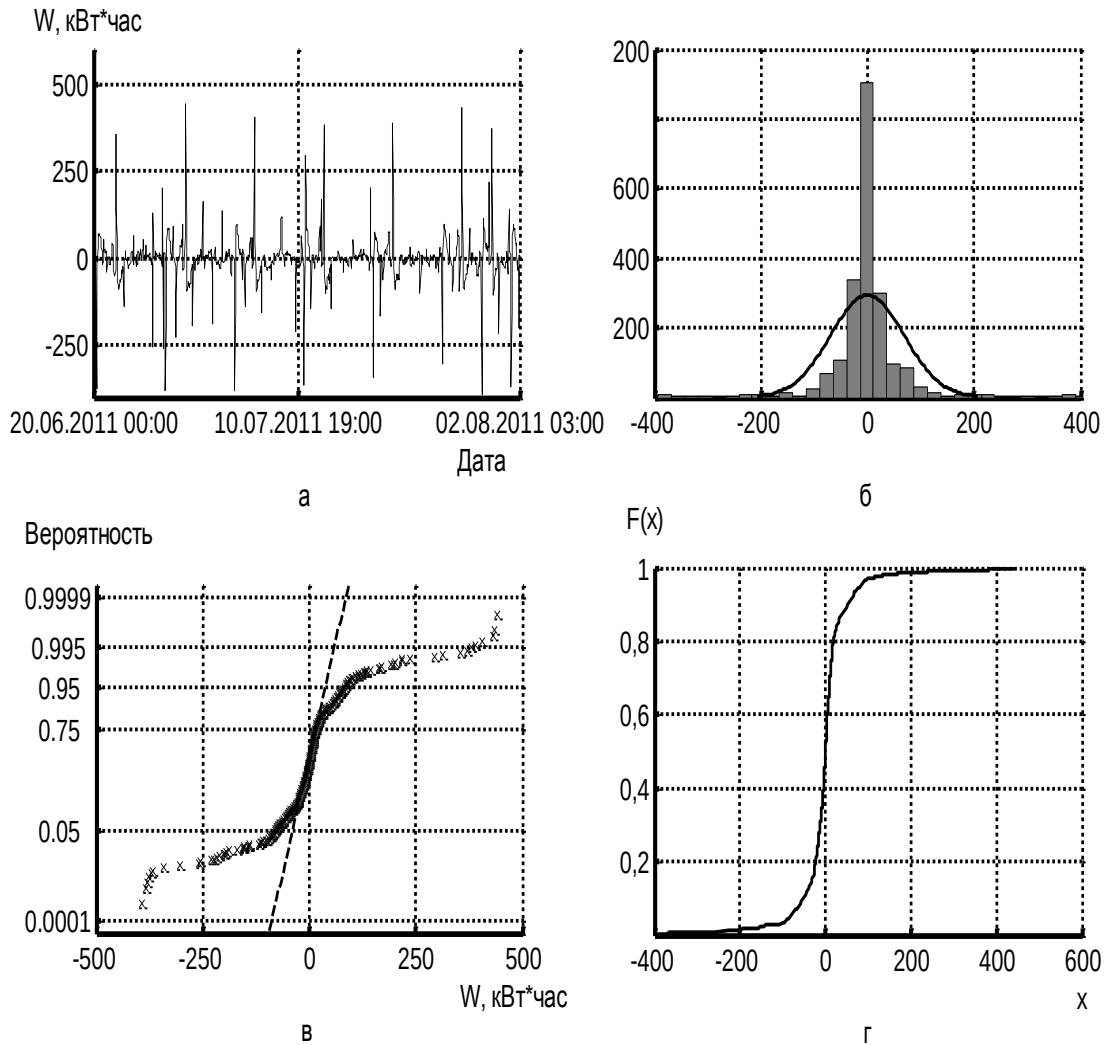


Рисунок 3.8 – Визуализация оценки нормальности распределения потребления ЭЭ после преобразования временного ряда: а – Недельный график нагрузки насосной станции 3-го подъема; б – Гистограмма потребление ЭЭ на каждый час с нормальным законом распределения; в – Вероятность нормального распределения потребления ЭЭ; г – Эмпирическая кумулятивная функция распределения

Таким образом, анализ исходных данных практически всегда является обязательной подготовкой для получения прогноза, так как позволяет выделить основные периоды тренда и оценить влияние различных факторов на график нагрузки. Анализ исходных данных также позволяет выявить anomalous данные, зашумленность графика нагрузки и т.д.



Последовательное выполнение процедур вейвлет фильтрации и автокорреляционного анализа показал, что уровни временного ряда отвечают условиям сопоставимости и достаточны для выполнения прогноза. В графике нагрузки закономерность данных преобладает над случайными значениями, подтверждая устойчивость ряда данных. Результатом Q-теста Льюинга-Бокса была подтверждена гипотеза наличия прогноза для потребления электрической энергии насосной станции третьего подъема. Также были выявлены устойчивые циклы работы основного технологического оборудования: изменения потребления ЭЭ в течение суток (утренние и вечерние максимумы, и ночные минимумы), а также цикличность изменения нагрузки в течение недели, что делает возможным получить достаточно точный прогноз на сутки вперед. Определены основные особенности технологического процесса производства, где основными потребителями являются насосные агрегаты, при этом на собственные нужды станции приходится лишь 2-3 % от суммарного потребления ЭЭ.

## **ГЛАВА 4. Прогнозирование потребления электрической энергии насосной станции третьего подъема**

Этап подтверждения гипотезы прогноза и анализа исходных данных предваряет решение проблемы выбора наилучшего метода прогнозирования с точки зрения учета всех влияющих на потребление ЭЭ факторов и получения наилучшей точности прогноза. Таким образом, получение точного прогноза позволит более эффективно осуществлять управление графиком нагрузки насосных агрегатов и снизить средневзвешенный тариф за потребленную ЭЭ, переводя насосную станцию в более экономичный режим работы. Так, например, при расчете за ЭЭ с третьей по шестую ЦК точный прогноз позволит качественно спланировать загрузку оборудования, при которой стоимость мощности в пиковые часы будет минимальна. Также для 5,6 ЦК внедрение прогнозного аппарата позволит минимизировать стоимость отклонений планового потребления ЭЭ от фактического значения.

В данной главе рассматривается возможность получения краткосрочного прогноза на сутки вперед с использованием однофакторных и многофакторных методик прогноза на примере реальных данных потребления ЭЭ ООО «Томскводоканал» с последующей оценкой стоимости полученных отклонений.

Исследуемыми однофакторными методами прогноза потребления электроэнергии являются: метод авторегрессионного проинтегрированного скользящего среднего (АРПСС); метод авторегрессионного проинтегрированного скользящего среднего с декомпозицией по вейвлет-базису; эконометрический метод ARMA/GARCH; метод нейронных сетей с разделением исходных данных на кортежи.

Однофакторные методы прогноза представляют собой получения прогноза исходя из исторических данных исходного временного ряда, т.е. исходя из единственного фактора.

Такие прогнозы дают высокую точность для временных рядов с четкой периодичностью и равномерностью данных, где явно выделены суточные,

сезонные циклы. Такие модели прогноза учитывают и оценивают плавность и регулярность технологических процессов, иными словами, осуществляют экстраполяцию процессов потребления ЭЭ, которые происходили в прошлом, и на основе статистических данных формируют прогноз на будущие периоды без оценки влияющих факторов.

Однофакторные методы прогноза успешно применимы для предприятий с ритмичным графиком нагрузки и выраженными периодами потребления электроэнергии, например, такими как предприятия водоснабжения, нефтяной промышленности.

#### **4.1 Однофакторное прогнозирование методом авторегрессии проинтегрированного скользящего среднего**

Одним из популярных на данный момент методов прогноза является однофакторный метод авторегрессии проинтегрированного скользящего среднего (АРПСС).

Модель прогноза АРПСС представлена в виде  $ARIMA(p,d,q)$ , где  $p$ –порядок авторегрессии,  $d$ –порядок разности временного ряда,  $q$ –порядок скользящего среднего.

Сам метод включает в себя 2 процесса:

##### **1. Процесс авторегрессии.**

Временные ряды данных содержат значения, которые последовательно зависимы друг от друга. Данную зависимость можно выразить в виде уравнения (4.1):

$$Y_t = a_0 + a_1 \cdot Y_{t-1} + a_2 \cdot Y_{t-2} + a_3 \cdot Y_{t-3} + \dots + \varepsilon_t, \quad (4.1)$$

где:  $a_0$ – константа (свободный член);  $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$  – параметры авторегрессии;  $Y$ – значение временного ряда;  $\varepsilon$  – белый шум. Белый шум представляет собой независимые величины случайного характера, последовательно распределенные с нулевым значением среднего.

В процессе авторегрессии каждое значение временного ряда представляет собой сумму случайной компоненты и комбинации предшествующих значений в форме линейной зависимости.

Процесс авторегрессии учитывает предыдущие значения для предсказания будущих значений.

## 2. Процесс скользящего среднего

Скользящее среднее учитывает влияние предыдущих ошибок на текущее значения ряда. Такая закономерность представлена в виде уравнения (4.2):

$$Y_t = b_0 + b_1 \cdot \varepsilon_{t-1} + b_2 \cdot \varepsilon_{t-2} + b_3 \cdot \varepsilon_{t-3} + \dots + \varepsilon_t, \quad (4.2)$$

где :  $b_0$  – константа (свободный член);

$b_1, b_2, b_3, \dots, b_n$  – параметры скользящего среднего.

Каждое значение ряда представляет собой сумму случайной составляющей в текущий момент времени и полученной комбинации случайных воздействий в предыдущие моменты времени по линейному закону. Иными словами, скользящее среднее необходимо для сглаживания временных рядов. Для этого определяется окно наблюдений, которое при прогнозировании выполняет сдвиг по временной шкале в область будущих значений. При этом выполняется усреднение или медиальное сглаживание наблюдений, попавших в данное окно.

Итоговые значения при скользящем среднем получаются при методическом повторении данной процедуры смещения временного окна на горизонт прогноза. Полученные средние значения образуют новый ряд данных, который формирует итоговые значения прогноза.

Полная модель АРПСС имеет вид (4.3):

$$Y_t = a_0 + a_1 \cdot Y_{t-1} + a_2 \cdot Y_{t-2} + a_3 \cdot Y_{t-3} + \dots + b_0 + b_1 \cdot \varepsilon_{t-1} + b_2 \cdot \varepsilon_{t-2} + b_3 \cdot \varepsilon_{t-3} + \dots + \varepsilon_t \quad (4.3)$$

Таким образом, скользящее среднее является оценкой текущего уровня в виде взвешенного среднего всех предшествующих уровней, точность прогноза возрастает при прогнозировании значений, близких к значениям конечных наблюдений. Ценность процесса авторегрессии заключается в степени взаимосвязанности и зависимости данных друг от друга.

Методику прогнозирования с помощью АРПСС можно представить в следующих этапах:

1. Представление исходных данных.
2. Использование спектрального анализ данных (анализ Фурье) для выявления регулярной сезонной составляющей в случае получения долгосрочных прогнозов.
3. Для уменьшения дисперсии можно использовать логарифмирование по экспоненте – *NaturalLog*.
4. Идентификация модели - поведение автокорреляционной и частной автокорреляционной функции. Для этого необходимо оценить порядок  $d$  и добиться стационарности ряда (автокорреляционная функция имеет тенденцию к затуханию, и нет наличия явно выраженного тренда). Если ряд не стационарен, то необходимо взять разность первого порядка. На практике взятие разностей редко применяют больше двух раз, так как редко встречаются модели с порядком разности ( $k$ ) больше двух. Если применение процедуры закончено на шаге  $k$ , то полагают, что  $d=k$ . Частная автокорреляционная функция также должна иметь затухающий характер. Для определения параметров  $p$  и  $q$  рассматривают поведение выборочных автокорреляционной и частной автокорреляционной функции ряда [46].

Выбор такой модели прогноза зависит от подготовленности ряда исходных данных к непосредственному осуществлению прогноза и анализа поведения автокорреляционной и частной автокорреляционной функции ряда.

На основании исследования поведения ряда данных (глава 2) в качестве модели прогноза выбрана модель  $ARIMA(1,1,1)$ , как наиболее характеризующая поведение автокорреляционной функции ряда [47-49].

На рисунке 4.1 представлен результат прогноза на стуки вперед для насосной станции, в качестве фактических данных были использованы почасовые значения потребления ЭЭ за март-апрель месяц 2011 года.

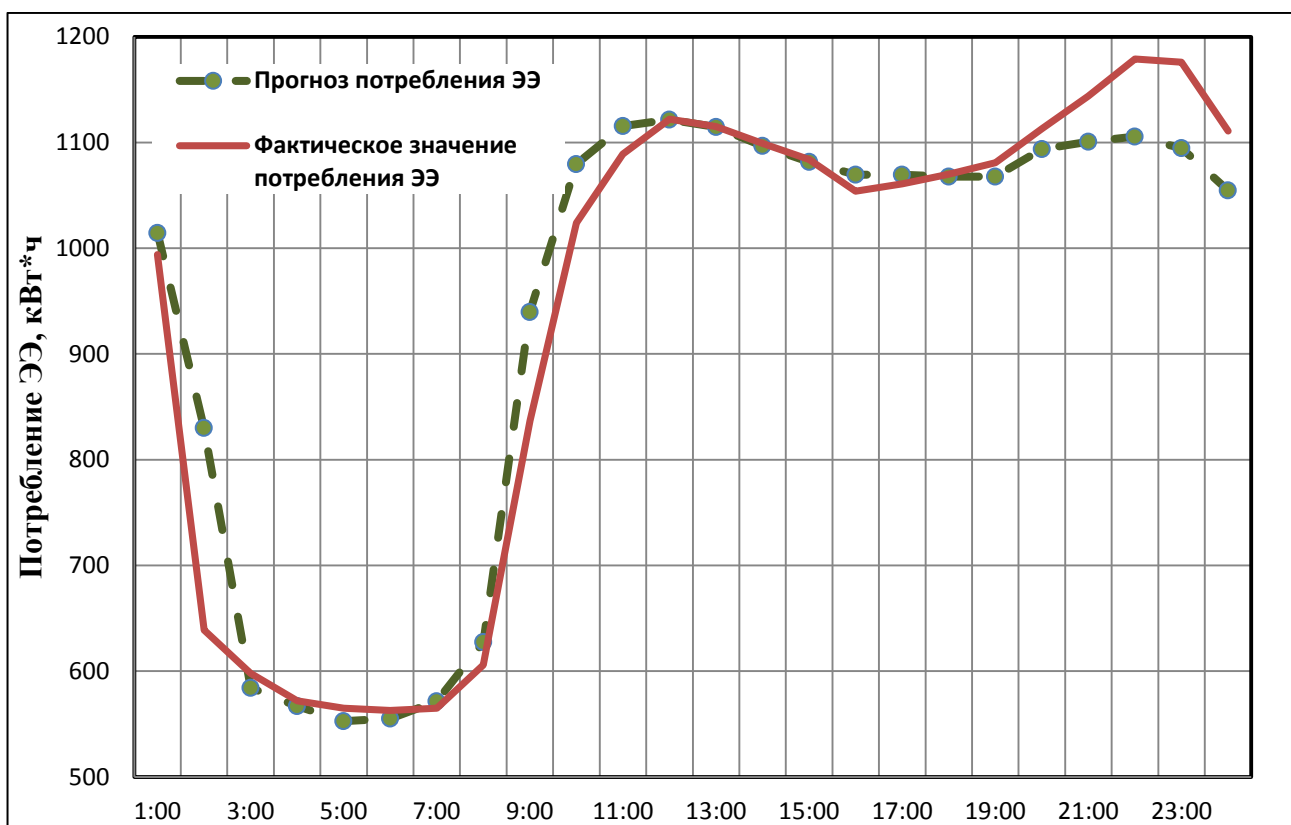


Рисунок 4.1 – Прогноз потребления ЭЭ «на сутки вперед» с использованием метода ARIMA

Численные значения прогноза потребления ЭЭ и суммы отклонений фактического потребления от планового значения представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты прогноза потребления ЭЭ методом АРПСС

| Время, час | Прогноз потребления ЭЭ, кВт*ч | Факт потребления ЭЭ, кВт*ч | Отклонения, кВт*ч |
|------------|-------------------------------|----------------------------|-------------------|
| 01:00      | 1014,335                      | 994                        | 20,335            |
| 02:00      | 829,999                       | 639                        | 190,999           |
| 03:00      | 584,329                       | 598                        | -13,671           |
| 04:00      | 566,994                       | 572                        | -5,006            |
| 05:00      | 552,826                       | 565                        | -12,174           |
| 06:00      | 555,242                       | 563                        | -7,758            |
| 07:00      | 571,449                       | 565                        | 6,449             |
| 08:00      | 627,553                       | 606                        | 21,553            |

|              |                  |              |                |
|--------------|------------------|--------------|----------------|
| 09:00        | 939,605          | 837          | 102,605        |
| 10:00        | 1079,631         | 1024         | 55,631         |
| 11:00        | 1115,644         | 1089         | 26,644         |
| 12:00        | 1121,651         | 1122         | -0,349         |
| 13:00        | 1114,654         | 1115         | -0,346         |
| 14:00        | 1096,655         | 1099         | -2,345         |
| 15:00        | 1081,656         | 1084         | -2,344         |
| 16:00        | 1069,657         | 1054         | 15,657         |
| 17:00        | 1069,657         | 1061         | 8,657          |
| 18:00        | 1067,657         | 1070         | -2,343         |
| 19:00        | 1067,657         | 1081         | -13,343        |
| 20:00        | 1093,657         | 1113         | -19,343        |
| 21:00        | 1100,657         | 1144         | -43,343        |
| 22:00        | 1105,657         | 1179         | -73,343        |
| 23:00        | 1094,657         | 1176         | -81,343        |
| 24:00        | 1054,657         | 1111         | -56,343        |
| <b>Итого</b> | <b>22576,137</b> | <b>22461</b> | <b>115,137</b> |

Относительная погрешность данного метода определяется путем расчёта погрешности за горизонт прогноза в целом и составляет 0,51 % от фактического потребления ЭЭ (сутки).

Данный метод оценки погрешности позволяет получить и оценить качество и точность прогноза, как на каждый час, так и усреднено за определенный период времени (сутки, неделя).

Несмотря на полученную погрешность прогноза менее 1 % за сутки в целом из полученных расчетов наблюдаются повышенные значений отклонений для следующих временных интервалов: 02:00, 09:00, 22:00, 23:00. Это связано с тем, что данный метод основывается, прежде всего, на линейной комбинации предыдущих значений потребления ЭЭ и при наличии резких изменений нагрузок в прошлом (например, аварийная ситуация), может искажать текущие значения

прогноза. В связи с тем, что наибольшие отклонения наблюдаются в часы пика энергосистемы (09:00,22:00), где стоимость ЭЭ максимальна, то это может привести к увеличению стоимости отклонений и росту средневзвешенного тарифа предприятия. Для минимизации таких отклонений необходима подготовка данных с исключением аномальных всплесков потребления ЭЭ, либо экспертный анализ полученного прогноза с применением корректирующих коэффициентов.

Тем не менее, данный метод имеет ряд преимуществ, таких как простота использования, при этом скользящая средняя формирует тренд графика нагрузки, в наибольшей степени приближенного к реальным значениям потребления ЭЭ, так как для отдельных фрагментов ряда данных потребления ЭЭ выбирается наилучший прогнозный тренд. Кроме того, такие модели позволяют осуществлять прогнозирование временных рядов с сезонной оставляющей.

#### **4.2 Однофакторный прогноз потребления электрической энергии с декомпозицией по вейвлет-базису**

Преимуществом использования вейвлет-анализа в качестве предварительного анализа данных является то, что данный метод позволяет выбирать оптимальные модели прогноза для каждого уровня разложения, а, следовательно, повышать точность прогноза, кроме того, такой анализ позволяет исключить шумовые высокочастотные составляющие [48].

Простой однофакторный прогноз с использованием метода АРПСС при построении прогноза способен учитывать лишь периодические составляющие и плавность тренда, но при этом может быть не чувствительным при резком изменении нагрузки. Для выделения составляющих графика нагрузки на практике применяют декомпозицию ряда - разложение на аппроксимирующие и детализирующие компоненты. Таким образом, ряд будет представлен в виде высокочастотных и низкочастотных составляющих. Для выделения составляющих сигнала, их анализа и дальнейшей реконструкции ряда данных применяется кратномасштабный (многомасштабный) анализ (КМА). Данный



анализ позволяет выполнить качественное разрешение на высоких частотах по временным интервалам и добиться качественного частотного разрешения на низких частотах.

Данный подход эффективен, если график нагрузки включает в себя короткие компоненты с большой амплитудой и протяженные низкочастотные компоненты[49].

При кратномасштабном анализе выполняется разложение сигнала по вейвлет - базису, который образован сдвигами вейвлет-функции и ее кратномасштабными копиями. Свертка сигнала с вейвлетами выполняется с целью выделения характерных особенностей ряда данных и при этом необходимо учитывать, что на результат свертки оказывает влияние масштаб вейвлета [50].

Одним из эффективных вейвлет-функций является Вейвлет Добеши, который представляет собой вейвлет с компактным носителем и с  $m$  нулевыми моментами. Эти свойства необходимы для обеспечения хороших свойств, приближения вейвлет-разложения.

Для получения аппроксимирующих коэффициентов применяется свертка сигнала с низкочастотным фильтром, для получения детализирующих коэффициентов применяются высокочастотные фильтры.

Затем получают обратное одноуровневое дискретное вейвлет-преобразование, и, следовательно, аппроксимационную и детализированную функцию от детализирующих и аппроксимирующих коэффициентов.

Далее производится многоуровневое одномерное вейвлет-разложение, которое выполняет разложение сигнала до уровня  $N$ , т.е. вычисляет аппроксимирующие коэффициенты и детализирующие коэффициенты каждого уровня разложения.

Понятие фильтра разложения низких и высоких частот представляет собой их близость к нулю или к  $\pm\pi$ . Фильтр  $\{h_n\}$  называется низкочастотным, если его передаточная функция  $H(\omega)$  в основном концентрируется на отрезке  $[-\pi/2, \pi/2]$

. Фильтр  $\{g_n\}$  называется высокочастотным, если его передаточная функция  $G(\omega)$  в основном концентрируется на отрезке  $[-\pi, \pi/2] \cup [\pi/2, \pi]$ .

Далее выполняется расчет аппроксимирующих и детализирующих коэффициентов одномерного сигнала для уровня разложения  $N$  с использованием векторов многоуровневого разложения.

Таким образом, получается сжатие исходной характеристики при каждом уровне в два раза.

С помощью функций *wrcoef*, которая предназначена для восстановления сигнала по одной ветви вейвлет-коэффициентов, восстанавливаются графики аппроксимирующей функции третьего уровня и детализирующей функций первого, второго и третьего уровня [48].

Таким образом, при вейвлет-анализе суммарный сигнал представляется в виде сглаженного сигнала, сформированного из аппроксимирующих коэффициентов, и колебаний, которые формируют значения детализирующих коэффициентов.

Случайные тенденции ряда исходных данных заложены в значениях детализирующих коэффициентах многоуровневого разложения. Таким образом, проводится пороговая обработка детализирующих коэффициентов. В данном случае значение случайной компоненты принимает значения меньшие, чем у основного сигнала. Следовательно, удаление случайных компонент высокой амплитуды заключается в том, чтобы «обнулить» детализирующие коэффициенты, меньшие уровня значения пороговой обработки.

Идентифицируются компоненты, содержащие шум, затем производится их удаление и построение сигнала с отсутствием данного шума.

В качестве метода декомпозиции ряда применяется разложение исходных данных по вейвлет- функции Добеши *db4s* глубиной разложения равной трем. Порядок вектора вейвлета *db4* связан с тем что с увеличением порядка вектора уваливается значение крутизны среза частотных характеристик, и, следовательно, увеличивается качество разложения и реконструкции сигнала. Таким образом,

при разложении будут сохраняться важные для построения прогноза особенности исходного ряда данных, что обеспечит увеличение точности прогноза [58,61].

Результаты разложения исходного графика на коэффициенты  $D1, D2, D3$  представлены на рисунке 4.2, и представляют собой изменения детализирующих составляющих ряда во времени на разных уровнях разложения. Такие коэффициенты позволяют оценить и выделить высокочастотные составляющие сигнала и, следовательно, выделить случайные шумовые компоненты. Коэффициенты вейвлет-преобразования раскрывают структуру сигнала при разных масштабах и в разных временных интервалах. При анализе допускается пренебречь значениями коэффициентов детализации для сглаженных областей сигнала.

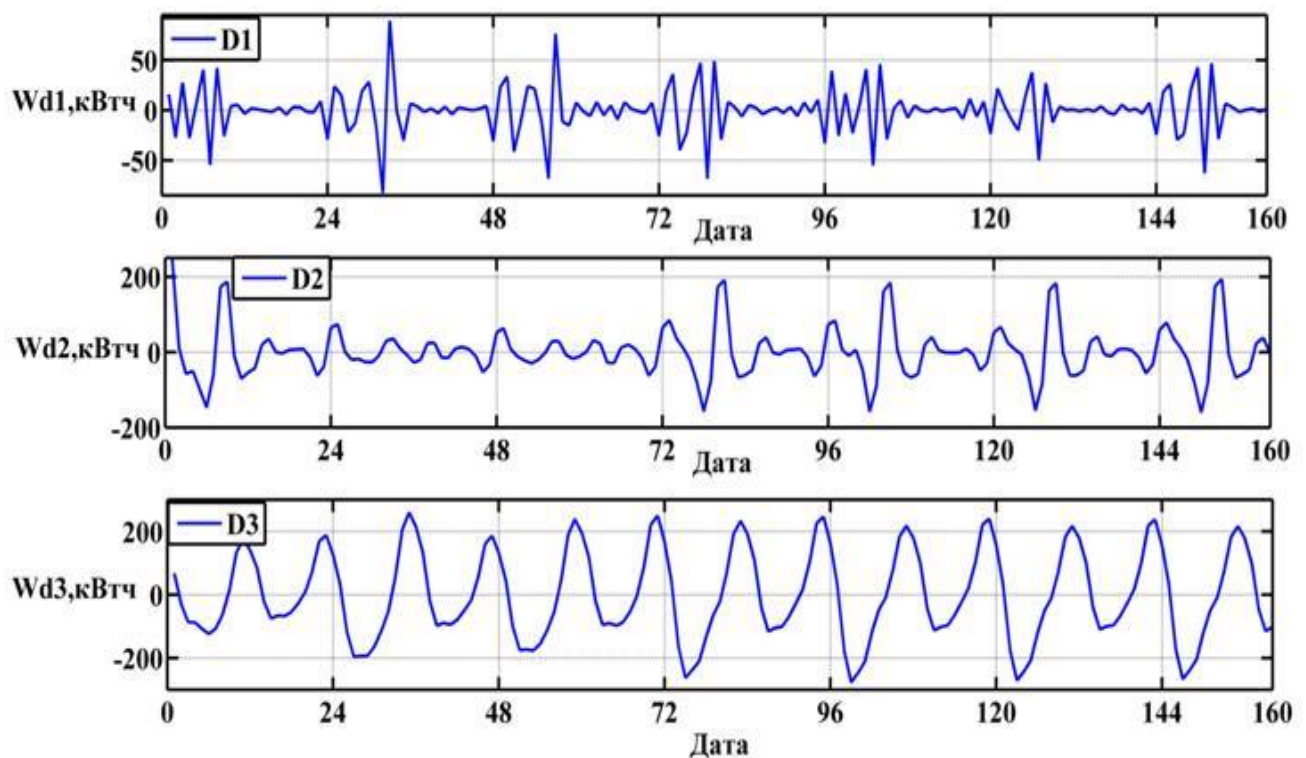


Рисунок 4.2 – Результат разложения на детализирующие коэффициенты исходного ряда по вейвлету Добеши  $db4$

График разложения  $A3$ , представленный на рисунке 4.3, характеризует аппроксимирующую составляющую на уровне разложения равном 3 (скайлинг-функция или масштабная функция), и представляет сглаженную функцию

исходного ряда данных за вычетом высокочастотных составляющих всех трех уровней.

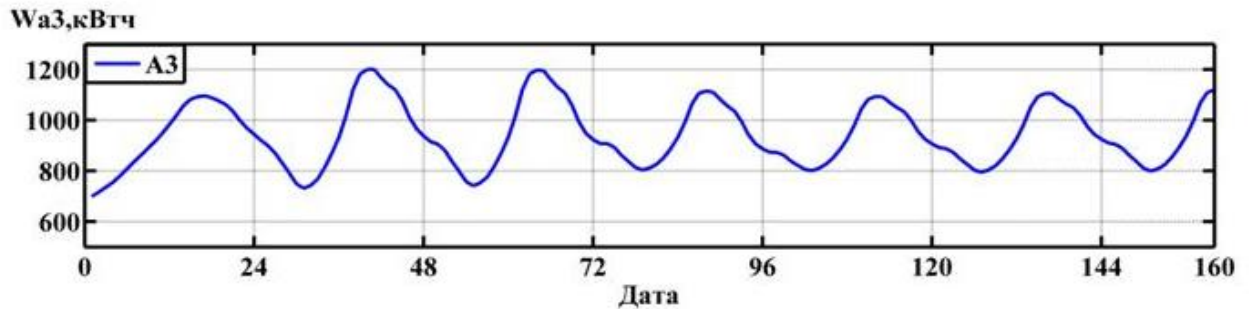


Рисунок 4.3 – Аппроксимирующая функция исходного ряда на уровне разложения равного трем

Для получения прогноза на стуки вперед получаем отдельный прогноз каждого из исследуемых коэффициентов.

На рисунке 4.4 и в таблице 4.2 представлен результат прогноза детализирующих и аппроксимирующих коэффициентов.

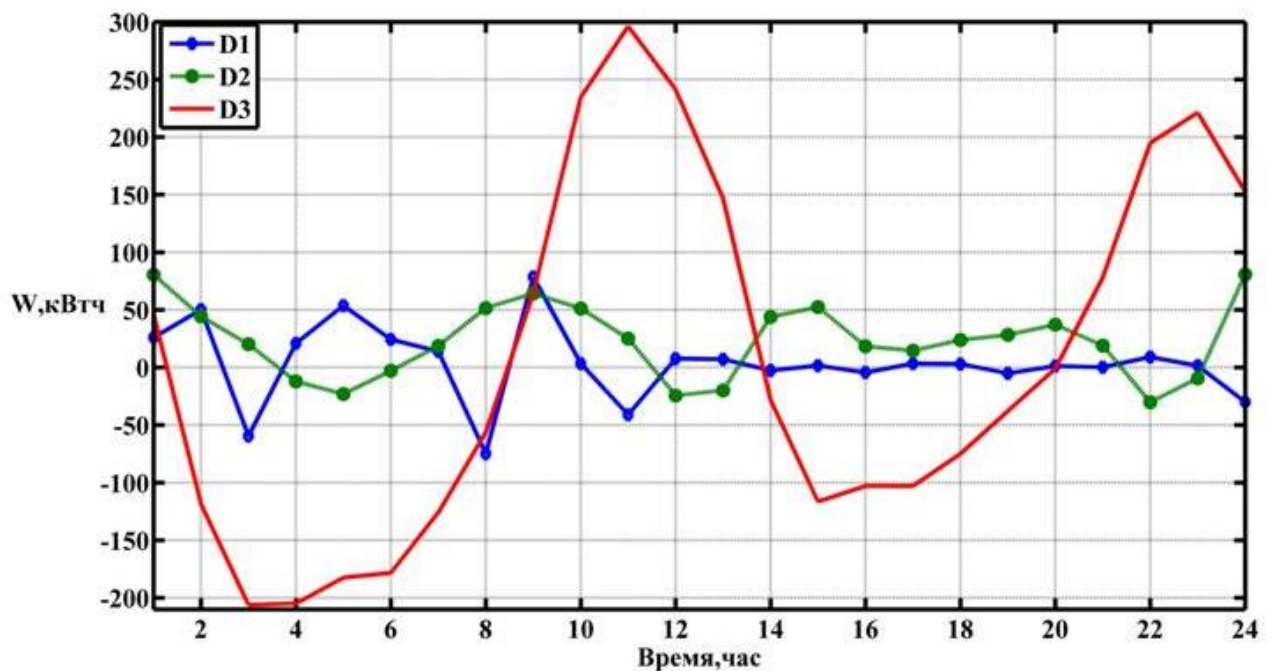


Рисунок 4.4 – Прогноз детализирующих коэффициентов первого, второго, третьего уровней разложения

Таблица № 4.2 – Результат прогноза аппроксимирующих и детализирующих коэффициентов

| Время, час   | D1, кВт*ч      | D2,кВт*ч        | D3,кВт*ч        | A3,кВт*ч          | Сумма прогнозов, кВт*ч |
|--------------|----------------|-----------------|-----------------|-------------------|------------------------|
| 01:00        | 25,9370        | 80,4788         | 45,951          | 850,867           | 1003,2338              |
| 02:00        | 50,1905        | 44,3289         | -118,561        | 649,043           | 625,0010               |
| 03:00        | -59,5919       | 20,1220         | -206,121        | 800,005           | 554,4135               |
| 04:00        | 20,8106        | -12,2617        | -204,937        | 758,707           | 562,3190               |
| 05:00        | 53,5642        | -23,0746        | -182,503        | 717,595           | 565,5820               |
| 06:00        | 24,2950        | -2,9161         | -178,393        | 747,894           | 590,8799               |
| 07:00        | 13,9225        | 18,6944         | -126,031        | 654,229           | 560,8150               |
| 08:00        | -74,8414       | 51,4960         | -56,447         | 665,642           | 585,8495               |
| 09:00        | 78,5676        | 64,1910         | 63,996          | 640,447           | 847,2019               |
| 10:00        | 3,3780         | 51,2579         | 234,595         | 737,415           | 1026,6462              |
| 11:00        | -41,1524       | 25,1265         | 296,188         | 792,094           | 1072,2562              |
| 12:00        | 7,6633         | -24,4114        | 241,158         | 891,524           | 1115,9337              |
| 13:00        | 7,0779         | -19,9813        | 146,690         | 984,914           | 1118,7004              |
| 14:00        | -2,5952        | 43,7945         | -28,331         | 1087,644          | 1100,5122              |
| 15:00        | 1,5908         | 52,3908         | -116,546        | 1141,938          | 1079,3734              |
| 16:00        | -4,3922        | 18,3385         | -102,861        | 1147,177          | 1058,2632              |
| 17:00        | 3,3598         | 14,5630         | -102,959        | 1148,217          | 1063,1808              |
| 18:00        | 2,9488         | 23,8136         | -75,049         | 1120,403          | 1072,1161              |
| 19:00        | -5,1855        | 28,2163         | -37,825         | 1087,861          | 1073,0673              |
| 20:00        | 1,1637         | 37,1418         | -1,158          | 1078,881          | 1116,0293              |
| 21:00        | 0,2171         | 18,9059         | 77,920          | 1037,957          | 1135,0004              |
| 22:00        | 8,9788         | -30,2197        | 194,875         | 1010,343          | 1183,9780              |
| 23:00        | 1,4831         | -9,5090         | 221,186         | 963,801           | 1176,9609              |
| 24:00        | -30,0631       | 80,8155         | 152,644         | 928,551           | 1131,9478              |
| <b>Итого</b> | <b>87,3271</b> | <b>551,3015</b> | <b>137,4813</b> | <b>21643,1516</b> | <b>22419,2615</b>      |

При этом ряды аппроксимирующих и детализирующих коэффициентов содержат полную информацию, адекватную информации в рядах предшествующего уровня. Таким образом, прогноз потребления ЭЭ на сутки вперед будет представлять собой сумму прогнозов детализирующих коэффициентов всех трех уровней разложения и прогноза аппроксимирующего коэффициента третьего уровня разложения. Полученный прогноз представлен в соответствии с рисунком 3.5 и формулой (4.4):

$$W_{\text{прогноз}} = A_{\text{Зпрогноз}} + D_{1\text{прогноз}} + D_{2\text{прогноз}} + D_{3\text{прогноз}} \sqrt{a^2 + b^2} \quad (4.4)$$

В таблице 4.3 представлен результат прогноза потребления ЭЭ.

Таблица 4.3 – Результат прогноза потребления ЭЭ

| Время, час | Сумма прогнозов,<br>кВт*ч | Факт,<br>кВт*ч | Отклонения,<br>кВт*ч |
|------------|---------------------------|----------------|----------------------|
| 01:00      | 1003,2338                 | 994            | 9,2338               |
| 02:00      | 625,0010                  | 639            | -13,9990             |
| 03:00      | 554,4135                  | 598            | -43,5865             |
| 04:00      | 562,3190                  | 572            | -9,6810              |
| 05:00      | 565,5820                  | 565            | 0,5820               |
| 06:00      | 590,8799                  | 563            | 27,8799              |
| 07:00      | 560,8150                  | 565            | -4,1850              |
| 08:00      | 585,8495                  | 606            | -20,1505             |
| 09:00      | 847,2019                  | 837            | 10,2019              |
| 10:00      | 1026,6462                 | 1024           | 2,6462               |
| 11:00      | 1072,2562                 | 1089           | -16,7438             |
| 12:00      | 1115,9337                 | 1122           | -6,0663              |
| 13:00      | 1118,7004                 | 1115           | 3,7004               |
| 14:00      | 1100,5122                 | 1099           | 1,5122               |
| 15:00      | 1079,3734                 | 1084           | -4,6266              |
| 16:00      | 1058,2632                 | 1054           | 4,2632               |
| 17:00      | 1063,1808                 | 1061           | 2,1808               |
| 18:00      | 1072,1161                 | 1070           | 2,1161               |
| 19:00      | 1073,0673                 | 1081           | -7,9327              |

|               |                   |              |                 |
|---------------|-------------------|--------------|-----------------|
| 20:00         | 1116,0293         | 1113         | 3,0293          |
| 21:00         | 1135,0004         | 1144         | -8,9996         |
| 22:00         | 1183,9780         | 1179         | 4,9780          |
| 23:00         | 1176,9609         | 1176         | 0,9609          |
| 24:00         | 1131,9478         | 1111         | 20,9478         |
| <b>Итого:</b> | <b>22419,2615</b> | <b>22461</b> | <b>-41,7385</b> |

В данном случае точность такого прогноза выше, чем в случае простого однофакторного прогноза методом АРПСС. За горизонт прогноза погрешность составила – 0,2 %.

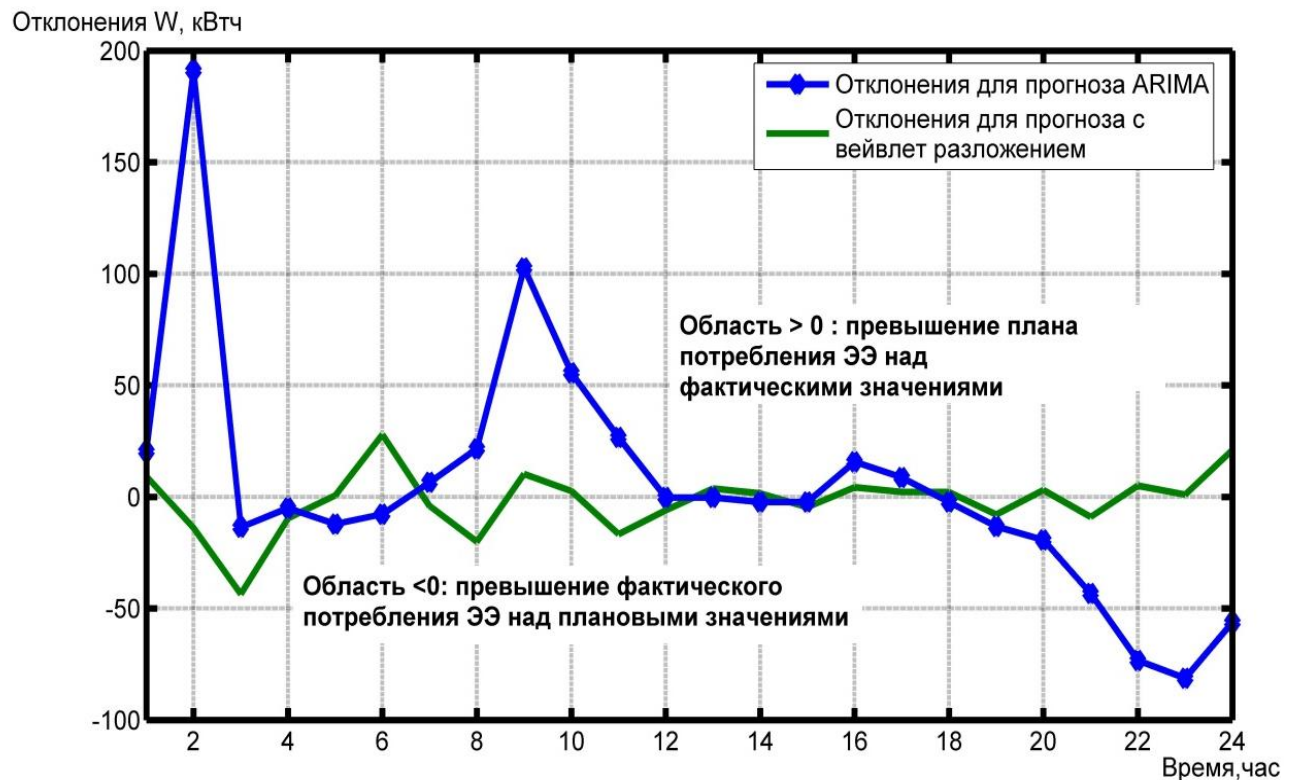


Рисунок 4.5 – График отклонений для результатов прогноза по методу АРПСС и разложения по вейвлет-базису Добеши

На рисунке 4.5 представлены графики полученных отклонений прогнозного потребления ЭЭ от планового значения при прогнозировании методом АРПСС и с использованием вейвлет-разложения. Полученный процент погрешности прогноза меньше уровня класса точности регистрирующего

прибора, который составляет 0,5S. Таким образом, это говорит о том, что в данном случае отклонения минимизированы практически до нуля.

К достоинствам вейвлет-анализа можно отнести: хорошее очищение данных от шума, поэтому для периодических графиков можно получить хорошую точность прогноза без влияния зашумленностей; способность по аналогии с анализом Фурье выделять значимые периоды тренда графика нагрузки, но при отсутствии явной периодичности в исходных данных можно использовать очищенный от шума ряд для прогнозирования с помощью других методов. Вейвлет-анализ также дает возможность выделять и проводить локальный анализ процессов при разном уровне масштабов и разложений, таким образом, повышая точность прогноза.

#### 4.3 Прогнозирование потребления электрической энергии эконометрическим методом ARMA/GARCH

Получение краткосрочного прогноза также возможно с использованием эконометрических моделей прогноза.

Для получения прогнозных значений используем метод (*Auto-regressive moving average ARMA(p, q)*)/ *Generalized autoregressive conditional heteroscedasticity(GARCH(p, q))*, который является мощным инструментом для построения точных прогнозов с малой дальностью прогнозирования [51].

Линейная модель предложенная ещё в 20-х-30-х годах прошлого века [52-53] нашла широкое применение в области финансового прогнозирования. Модель *ARMA* включает в себя, по аналогии с АРПСС методом: модель авторегрессии (*AR*) и модель скользящего среднего (*MA*), и может быть описана уравнением (4.5)

$$y_t = C + \varepsilon_t + \sum_{i=1}^p \phi_i \cdot y_{t-i} + \sum_{j=1}^q \theta_j \cdot \varepsilon_{t-j}, \quad (4.5)$$

где  $p$  и  $q$  – целые числа, задающие порядок модели;

$C$  – константа;



$\{\varepsilon_t\}$  – шумовая компонента, которая представляет собой последовательность независимых и одинаково распределенных случайных величин с нулевым значением среднего;

$\phi_i$  и  $\theta_j$  – коэффициенты авторегрессии и коэффициенты скользящего среднего [54].

*GARCH* процесс, предложенный Т. Боллерслевом [55], моделирует тот факт, что на текущую условную дисперсию влияют как предыдущее изменение потребления ЭЭ, так и предыдущие оценки условной дисперсии.

С помощью модели *GARCH*( $p, q$ ) для исходного ряда данных определяется условную дисперсию, уравнение которой  $\sigma_t^2 = E_{t-1}(\varepsilon_t^2)$  имеет вид согласно формуле (4.6):

$$\sigma_t^2 = K + \sum_{i=1}^P G_i \sigma_{t-i}^2 + \sum_{j=1}^Q A_j \varepsilon_{t-j}^2 \quad (4.6)$$

с ограничениями  $\sum_{i=1}^P G_i + \sum_{j=1}^Q A_j < 1$ ,  $K > 0$ ,  $G_i \geq 0$ ,  $A_j \geq 0$ ,

где  $p$  – количество предшествующих оценок изменения потребления ЭЭ, влияющих на текущую;

$q$  – количество последних изменений потребления электроэнергии, влияющих на текущее потребление;

$K$  – константа;

$G_i$  – весовые коэффициенты, определяющие степень влияния предыдущих оценок изменений потребления электроэнергии на текущее значение;

$A_i$  – весовые коэффициенты, определяющие степень влияния предыдущих изменений потребления электроэнергии на текущее значение потребления;

$\varepsilon$  – предыдущие изменения потребления электроэнергии.

Для построения модели и прогноза использована функция *GARCHTool*, которая позволяет оценить общую модель *GARCH* [24]. Полученные коэффициенты модели приведены в таблице 4.4.

В результате получена модель для прогнозирования со следующими параметрами *ARMA(1,1)/GARCH(1,1)*. В скобках приведены значения стандартных ошибок.

Таблица 4.4 – Коэффициенты модели *ARMA(1,1)/GARCH(1,1)*

| Параметры    | <i>ARMA(1,1)</i>      | Параметры       | <i>GARCH(1,1)</i>        |
|--------------|-----------------------|-----------------|--------------------------|
| <i>C</i>     | -0,6399<br>(2,081842) | <i>K</i>        | 359,3306<br>(125,989190) |
| <i>AR(1)</i> | 0,4088<br>(0,079626)  | <i>GARCH(1)</i> | 0,8837<br>(0,039658)     |
| <i>MA(1)</i> | 0,1357<br>(0,083431)  | <i>ARCH(1)</i>  | 0,0134<br>(0,003490)     |

Анализируя полученные данные, можно сделать вывод о том, что все коэффициенты значимы, т.к. превышают ошибку практически на порядок. Все ограничения для модели *GARCH(p, q)* выполнены ( $K=359,3306>0$ ,  $G=GARCH(1)=0,8837>0$ ,  $A=ARCH(1)=0,0134>0$ ). Подставляя данные значения, получены следующие уравнения (4.7- 4.8):

$$\sigma_t^2 = 359,3306 + 0,8837 \cdot \sigma_{t-1}^2 + 0,0134 \cdot \varepsilon_{t-1}^2 \quad (4.7)$$

$$y_t = -0,6399 + \varepsilon_t + 0,4088 \cdot y_{t-1} + 0,1357 \cdot \varepsilon_{t-1} \quad (4.8)$$

В таблице 4.5 приведены результаты прогноза потребления ЭЭ методом *ARMA/GARCH*.

Таблица 4.5 – Результаты прогноза потребления ЭЭ методом *ARMA/GARCH*

| Время, час | Прогноз потребления ЭЭ, кВт*ч | Факт потребления ЭЭ, кВт*ч | Отклонения ЭЭ, кВт*ч |
|------------|-------------------------------|----------------------------|----------------------|
| 01:00      | 572                           | 572                        | 0                    |
| 02:00      | 551,86                        | 565                        | -13,14               |
| 03:00      | 553,897                       | 563                        | -9,103               |
| 04:00      | 569,9093                      | 565                        | 4,9093               |
| 05:00      | 625,9143                      | 606                        | 19,9143              |
| 06:00      | 937,9163                      | 837                        | 100,9163             |

|              |                  |               |                 |
|--------------|------------------|---------------|-----------------|
| 07:00        | 1077,917         | 1024          | 53,917          |
| 08:00        | 1113,918         | 1089          | 24,918          |
| 09:00        | 1119,918         | 1122          | -2,082          |
| 10:00        | 1112,918         | 1115          | -2,028          |
| 11:00        | 1094,918         | 1099          | -4,082          |
| 12:00        | 1079,918         | 1084          | -4,082          |
| 13:00        | 1067,918         | 1054          | 13,918          |
| 14:00        | 1067,918         | 1061          | 6,918           |
| 15:00        | 1065,918         | 1070          | -4,082          |
| 16:00        | 1065,918         | 1081          | -15,082         |
| 17:00        | 1091,918         | 1113          | -21,082         |
| 18:00        | 1098,918         | 1144          | -45,082         |
| 19:00        | 1103,918         | 1179          | -75,082         |
| 20:00        | 1092,918         | 1176          | -83,082         |
| 21:00        | 1052,918         | 1111          | -58,082         |
| 22:00        | 1038,91          | 1109          | -70,09          |
| 23:00        | 1185,718         | 1085          | 100,718         |
| 24:00        | 1056,879         | 1032          | 24,879          |
| <b>Итого</b> | <b>23 400,77</b> | <b>23 456</b> | <b>-55,1731</b> |

Результаты прогнозирования представлены в соответствии с рисунком 4.6.

Данный результат прогноза помимо информации о самих прогнозных значениях содержит сведения об области вероятных значений. Данная область характеризует возможности изменения прогнозной величины в представленных на рисунке 4.6 пределах, где рассмотрены другие варианты прогноза, а в качестве расчетного прогноза выбран усредненный результат вариантов прогноза.

Наименьшая область вероятных значений характерна для утреннего и вечернего изменения нагрузки, когда разбор воды в системе наибольший. Скорость изменения потребления воды в эти часы практически одинакова для

любого дня недели, а, следовательно, и изменение потребление ЭЭ, что и характеризует сужение области вероятных значений.

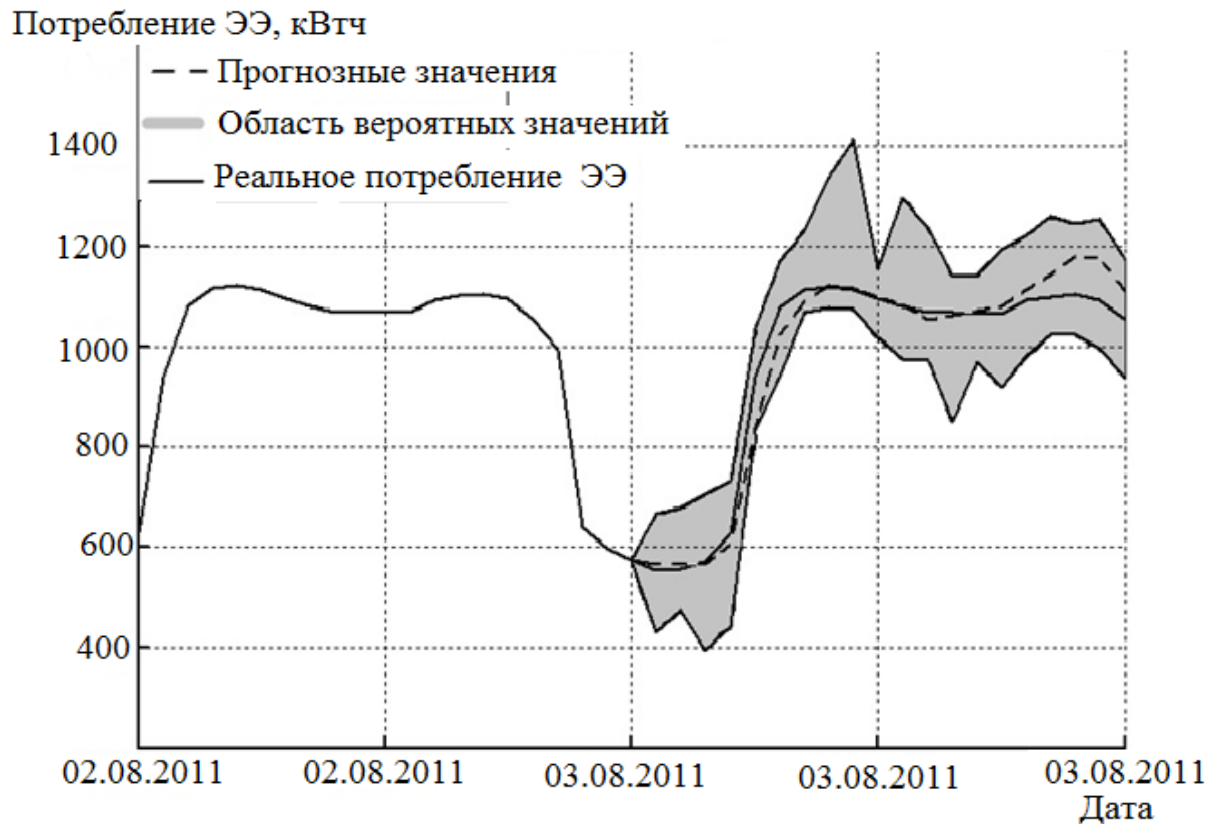


Рисунок 4.6 – Прогнозирование потребления электроэнергии

В связи с тем, что данная модель прогноза ориентирована на скорость изменения исследуемой величины, то для областей стабильного потребления ЭЭ характерно расширение области вероятных значений, так как скорость изменения разбора воды на этих участках времени различна в разные дни, хоть и не намного отличается по уровню потребления объёмов воды.

Всесторонний анализ остатков показал, что, используя модель  $ARMA(1,1)/GARCH(1,1)$ , была построена адекватная модель прогноза потребления ЭЭ на каждый час суток с точностью 2,7%. Для данного среднесрочного прогноза точность была рассчитана по методу среднего за горизонт прогноза, следовательно, если рассматривать прогноз на сутки вперед по часам, то точность может быть ниже, чем средняя за рассмотренный период

времени (изменяется от 0,18%). Точность данного прогноза можно также повысить, применив для каждого интервала времени из всех вариантов прогноза наиболее оптимальные, типичные участки, таким образом, снизив погрешность практически до 0% [24].

#### **4.4 Прогнозирование потребления электрической энергии с использованием нейронных сетей**

В качестве метода прогноза был выбран метод нейронных сетей с погружением в нейросетевой логический базис. Считается, что нейронные сети превосходят по точности прогноза многие классические модели прогнозирования при работе с экспериментальными производственными данными, и такой метод может быть эффективен при построении прогноза потребления ЭЭ для промышленного предприятия [56-59].

Нейронные сети представлены фундаментальной теоремой Такенса [60], которая на основании повторяемости наблюдений дает возможность формирования прогноза будущих значений ряда на основании конечного числа его предыдущих значений.

Данная теорема в качестве модели прогноза приводится в виде уравнения (4.9), представляющего схему авторегрессии вида:

$$X(t+d) = \psi(x(t), \dots, x(t-l), \mu_1, \mu_2, \dots, \mu_k) \quad (4.9)$$

где  $d$  – лаг прогнозирования;  $l$  – окна погружения (ширина);  $k$  – количество независимых переменных.

Формула (4.9) сводит задачу прогнозирования к задаче нейронного анализа с целью аппроксимации функций нескольких переменных по заданному набору обучающих примеров за счет погружения данных ряда в многомерное пространство структуры нейронной сети.

Реализацию данного метода прогноза произведем с использованием прикладного пакета Matlab- *NNtools*. В качестве исходных данных представлена информация о почасовых потреблении ЭЭ НС 3-го подъема за период 7 недель.

Если воспользоваться методикой прогноза слабоструктурированных сетей и разделить все данные на три равных кортежа и для каждого кортежа построить независимо от другого прогноз на «сутки вперед», то таким образом для каждого часа можно выбрать наилучший прогноз из трех.

Для слабо структурированных временных рядов применяют разделение исходных данных на равные числовые массивы, в связи с тем, что нечеткое число (НЧ) характеризуется кортежем согласно формуле (4.10):

$$\{x^j / \mu(x^j)\}, \mu(x^j) \rightarrow [0,1], j = 1, 2, \dots, J \quad (4.10)$$

Для которых применяются допущения о динамике ряда:

1. Характер функции принадлежности  $\mu(x(t))$  остается неизменным на протяжении всего времени существования временного ряда. В таком случае ряд характеризуется двумя параметрами:  $x(t)$ ,  $r_x(t) = [x^{\max}, x^{\min}]$ , где  $r_x(t)$  - размах значений.

2. Прогнозирование нечеткого ряда возможно выполнить независимо в отдельности для  $x(t)$ ,  $r_x(t)$ ,  $\mu(x(t))$  с соответствующими рядами по формулам (4.11):

$$x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}, r_x = \{r_{x1}, r_{x2}, \dots, r_{xn}\}, \mu_x = \{\mu_{x1}, \mu_{x2}, \dots, \mu_{xn}\} \quad (4.11)$$

Весь временной ряд длины  $n$  разбивается на окна длиной  $l$ . И обучающая последовательность имеет вид (4.12) :

$$(x_i, x_{i+1}, \dots, x_{l-i+1}) \rightarrow x_{l+1}, i = 1, \dots, n-l \quad (4.12)$$

Значение  $x_{l+1}$  «снимается» с выхода построенной НС при подаче на вход вектора  $\{x_i, x_{i+1}, \dots, x_{l-i+1}\}$ , валидационная выборка конструируется таким образом, чтобы в ее состав входили значения, которые принадлежат двум окнам, но не входили в состав обучающих выборок, тестовая выборка может совпадать с валидационной [61].

В качестве структуры сети была выбрана трехслойная сеть, достоинством которой является возможность получения прогнозов для переменных данных. Дальнейшее увеличение количества слоев сети усложняется процесс обучения

сети, а, следовательно, увеличивается трудоемкость в получении качественного прогноза.

Для исходных данных потребления ЭЭ выбрана следующая структура сети:

$w=4$  – количество нечетких переменных;

$v=3$  - размер каждой нечеткой переменной;

$n=v*w=12$  - число нейронов первого слоя;

$m=9$  - число нейронов второго слоя;

$k=v=3$  - число нейронов третьего слоя;

Количество эпох для тренировки модели = 67 [62,63]

Для работы программы данные преобразованы в удобный для расчета вид.

Результат прогноза представлен на рисунке 4.7 и в таблице 4.6.

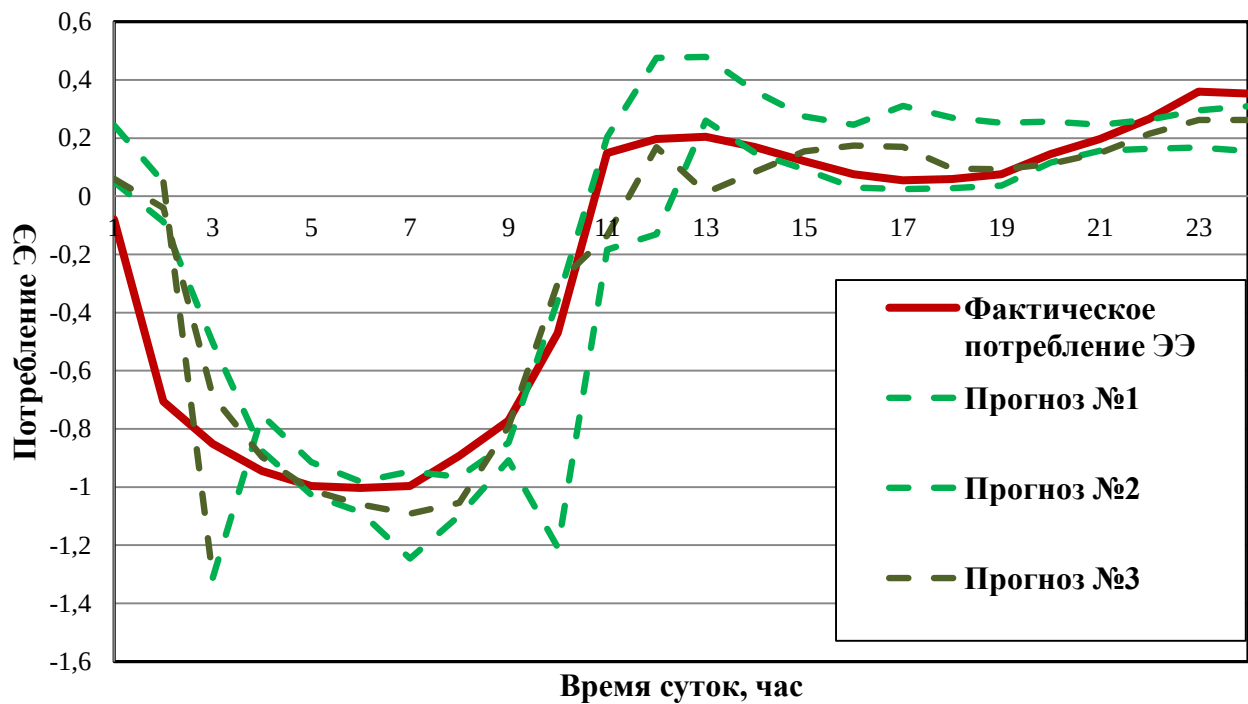


Рисунок 4.7 – Результат прогнозирования методом нейронных сетей

Из трех полученных результатов прогноза выбираем наиболее близкий к фактическому профилю электропотребления по каждой из точек прогноза и получаем результат прогноза в реальных единицах измерения, представленный на рисунке 4.8.

Таблица 4.6 – Результат прогноза методом нейронных сетей

| Час<br>суток | Фактич.<br>потребление ЭЭ | Прогноз<br>потребления<br>№ 1 | Прогноз<br>потребления<br>№ 2 | Прогноз<br>потребления<br>№ 3 | Наилучшее<br>значение<br>прогноза |
|--------------|---------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| 1            | -0,07958                  | 0,24403                       | 0,049109                      | 0,060078                      | 0,049109                          |
| 2            | -0,70588                  | 0,047574                      | -0,08751                      | -0,04033                      | -0,08751                          |
| 3            | -0,85121                  | -1,31128                      | -0,50326                      | -0,68764                      | -0,68764                          |
| 4            | -0,94464                  | -0,75286                      | -0,8757                       | -0,89725                      | -0,89725                          |
| 5            | -0,99654                  | -0,9148                       | -1,0264                       | -1,01107                      | -1,01107                          |
| 6            | -1,00346                  | -0,98125                      | -1,08577                      | -1,06004                      | -0,98125                          |
| 7            | -0,99654                  | -0,9467                       | -1,24618                      | -1,09137                      | -1,09137                          |
| 8            | -0,89273                  | -0,96533                      | -1,09771                      | -1,05395                      | -0,96533                          |
| 9            | -0,77163                  | -0,84745                      | -0,90743                      | -0,79115                      | -0,79115                          |
| 10           | -0,47059                  | -0,35677                      | -1,20793                      | -0,29843                      | -0,35677                          |
| 11           | 0,148789                  | 0,203822                      | -0,18343                      | -0,13519                      | 0,203822                          |
| 12           | 0,197232                  | 0,475925                      | -0,13028                      | 0,168592                      | 0,168592                          |
| 13           | 0,204152                  | 0,479555                      | 0,2605                        | 0,012822                      | 0,2605                            |
| 14           | 0,16955                   | 0,361369                      | 0,148747                      | 0,084221                      | 0,148747                          |
| 15           | 0,121107                  | 0,274332                      | 0,093376                      | 0,154505                      | 0,154505                          |
| 16           | 0,076125                  | 0,246441                      | 0,030408                      | 0,17439                       | 0,030408                          |
| 17           | 0,055363                  | 0,310483                      | 0,024437                      | 0,169765                      | 0,024437                          |
| 18           | 0,058824                  | 0,270292                      | 0,027456                      | 0,095373                      | 0,027456                          |
| 19           | 0,076125                  | 0,252403                      | 0,036836                      | 0,093374                      | 0,093374                          |
| 20           | 0,145329                  | 0,257309                      | 0,11643                       | 0,111432                      | 0,11643                           |
| 21           | 0,197232                  | 0,245434                      | 0,15639                       | 0,148633                      | 0,15639                           |
| 22           | 0,266436                  | 0,263082                      | 0,162961                      | 0,215509                      | 0,263082                          |
| 23           | 0,359862                  | 0,295842                      | 0,16733                       | 0,262469                      | 0,295842                          |
| 24           | 0,352941                  | 0,31023                       | 0,155144                      | 0,262469                      | 0,31023                           |





Рисунок 4.8 –Наилучший результат прогнозирования методом нейронных сетей

Таким образом, нейронные сети характеризуются высокой точностью полученного прогноза при работе с экспериментальными производственными данными

На основании проведенного в работе анализа методов однофакторного прогнозирования, можно сделать следующие выводы:

- Прогноз в виде инструмента оптимизации позволяет сэкономить денежные средства предприятию и снизить стоимость отклонений ЭЭ, если предприятие выбирает для расчетов пятую или шестую ЦК, а для 3 и 4 ЦК позволяет спрогнозировать пиковые нагрузки.
- Наиболее точными, применительно к данным графика нагрузки НС 3-го подъема, является прогнозирование по методам нейронных сетей и методу АРПСС с вейвлет-прогнозированием. 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.

## **ГЛАВА 5. Прогнозная оптимизация работы насосной установки**

### **5.1 Основные параметры работы технологического оборудования насосной станции третьего подъема**

В главе 4 были рассмотрены методы прогнозирования на примере реальных производственных данных объекта водоснабжения. В связи с тем, что прогнозирование может выступать как один из инструментов оптимизации работы оборудования, то в комбинации с выбором адекватной модели регулирования электропривода насосной установки можно получить значительную экономию потребляемой ЭЭ.

Процесс оптимизации режима работы электропривода напрямую связан с улучшением энергетических характеристик технологических комплексов. Использование многосвязных систем, контролирующих сумму управляемых параметров, нацелено в первую очередь на снижение уровня потребления ЭЭ, улучшение качества ЭЭ и непосредственно надежности производства. Применительно к насосным агрегатам тракта водоснабжения традиционным решением уровня оптимизации технологического процесса является применение частотного регулирования насосной установки с векторным или адаптивным управлением [4]. На примере процесса подъема технической воды проводится оценка технико-экономических аспектов подобного подхода. Схема технического водоснабжения приведена на рисунке 5.1.

Первым этапом процесса водоснабжения является подъем технической воды из р.Томь, которую осуществляет насосно-фильтровальная станция (НФС) для дальнейшей подачи к НС 3-го подъема, а затем к пиковой резервной котельной (ПРК).

НФС представляет собой ряд основных инженерных сооружений: водозаборного устройства со станцией первого подъема, станции водоподготовки, резервуара чистой воды, насосной станции второго подъема для поддержания давления и подачи воды потребителю в требуемом объёме и комплекс различной

контрольно-защитной аппаратуры. Насосно-фильтровальная станция осуществляет функции водоподготовки и подъема, поддерживая давление на выходе станции в диапазоне  $7,0 \div 7,6$  атм, и обеспечивая подачу воды, в требуемом объеме, потребителю.

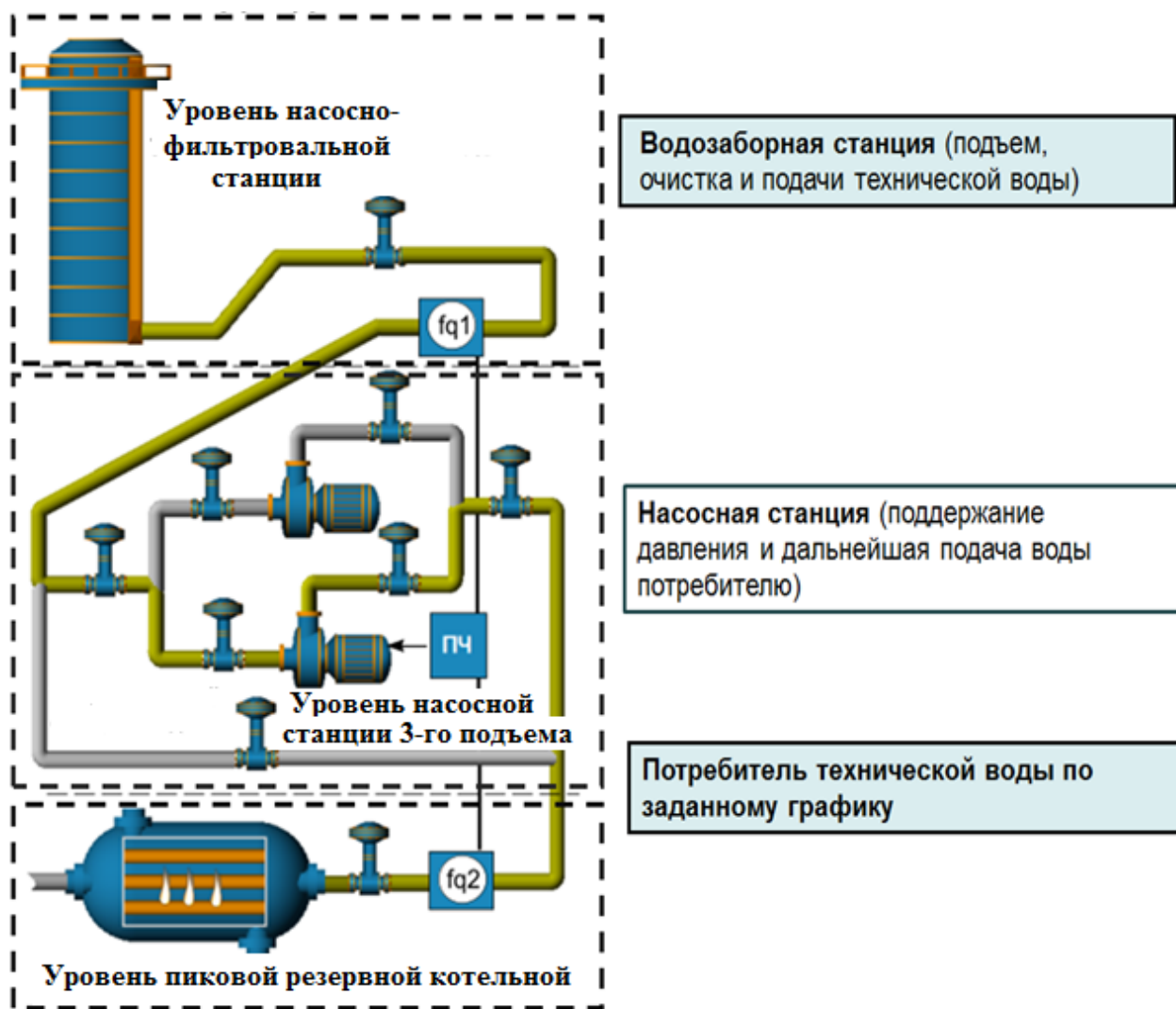


Рисунок 5.1 –Схема технического водоснабжения

Для подъема технической воды используют высоковольтный насосный агрегат и низковольтный, которые обеспечивают в водоводе технической воды давление равное  $7,0-7,6$  атм в зависимости от времени суток, что необходимо для поднятия воды на разность уровня высот 74 метра между НФС (уровень высот равный 73 м) и НС 3-го подъема (уровень высот равный 147м). Контроль расхода

и давления на выходе станции производится по показаниям контрольно-измерительных приборов и фиксируется в журнале измерений.

Очистка технической воды производится с использованием скорых блоков фильтров и хлораторного оборудования.

Далее посредством систем трубопроводов диаметром 1200 мм и длиной 13637 м и трубопровода диаметром 1000 мм длиной 837 метров осуществляется подача очищенной технической воды к НС 3-го подъема.

НС 3-го подъема осуществляет поддержание необходимого давления в трубопроводе. Контроль расхода и давления производится исходя из установленных приборов учета на входе и выходе станции. Также на станции имеется контроль аварийных режимов и защита от «сухого хода», а также отдельный трубопровод, который применяется на время аварийных работ. НС 3-го подъема осуществляет дальнейшую поддержку необходимого давления (7 атм) в трубопроводе.

Основными элементами на НС 3-го подъема для технического водоснабжения являются три насосных агрегата: 2 насосных агрегата АД3200-75-2 с электроприводом мощностью 400 кВт и насос Grundfos NB 80-200/211 мощностью 45 кВт с приводным двигателем MJ225 -2 -55F которые обеспечивают технической водой ряд предприятий г. Томска.

Для нужд пиковой ПРК из состава парка насосных агрегатов станции задействована лишь насосная установка *Grundfos NB 80-200/211* мощностью 45 кВт с приводом двигателя MJ225-2-55F, представленных на рисунке 5.2. Двигатель оснащен ПЧ и обеспечивает заданный объем потребления воды и уровень давления на входе ПРК в диапазоне 5÷5,5 атм.



Рисунок 5.2 – Насосная установка *Grundfos NB 80-200/211* с приводом

На рисунке 5.3. показан типичный суточный график потребления воды ПРК.

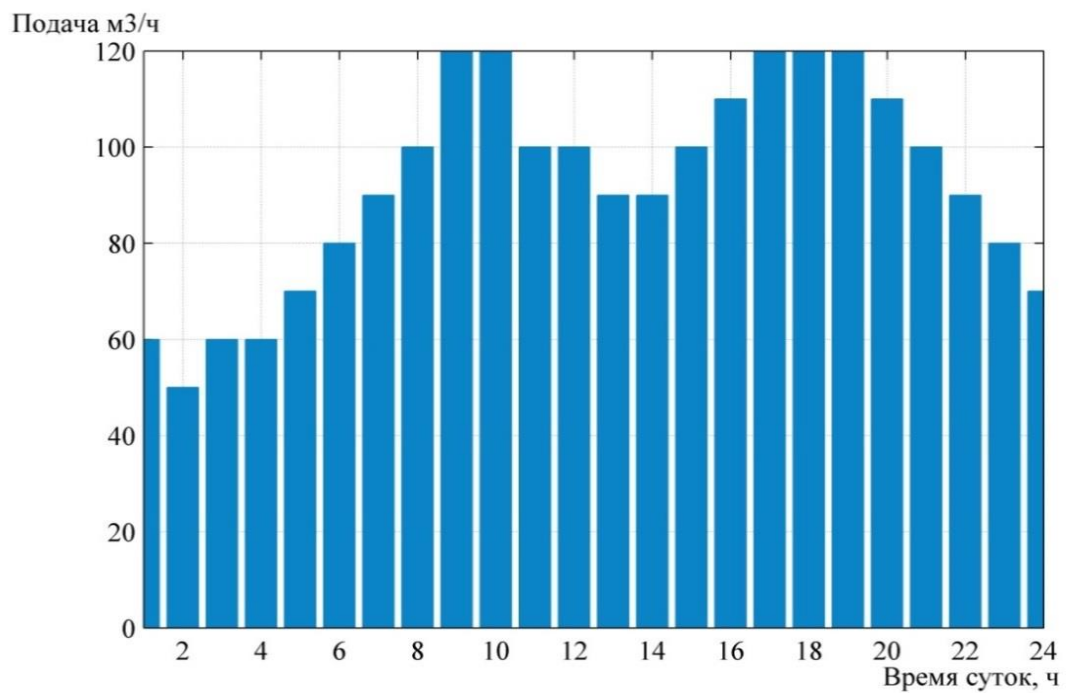


Рисунок 5.3– Суточный график потребления воды ПРК

Для обеспечения функционирования процессов ПРК необходима очищенная техническая вода с графиком потребления, представленным в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Данные по потреблению воды

| Время суток, час | Расход, м3 |
|------------------|------------|
| с 01.00-06.00    | 50-70      |
| с 05.00-06.00    | 70-90      |
| с 06.00-18.00    | 90-120     |
| с 18.00-24.00    | 120-70     |
| с 24.00-01.00    | 70-50      |

Для создания имитационной модели насосной станции, которая бы обеспечивала график водоразбора ПРК, исходя из данных таблицы 5.1, необходимо произвести расчет математической модели привода электрической нагрузки, в роли которого выступает двигатель MJ225-2-55F.

## 5.2 Математическая модель асинхронного двигателя

Математическая модель асинхронного двигателя (АД) в программной среде MATLAB/Simulink имеет Т-образную схему замещения в соответствии с рисунком 5.4.

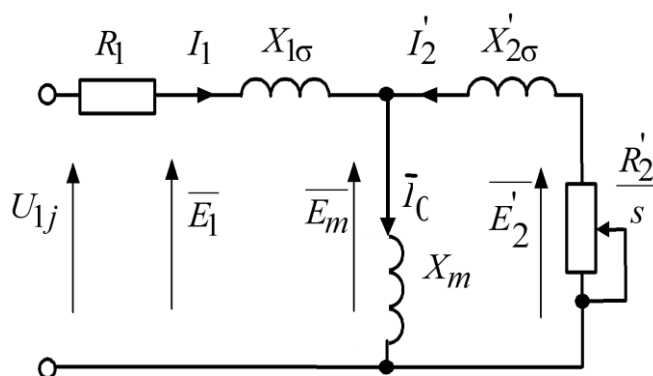


Рисунок 5.4 – Т-образная схема замещения асинхронного двигателя

На схеме замещения приведены следующие параметры:

**Для обмотки статора:**

$U_{1j}$  – фазное напряжение;

$R_1$  – активное сопротивление ;

$X_{1\sigma}$  – индуктивное сопротивление;

$I_1$  – ток;

$E_1$  – ЭДС.

**Для обмотки ротора:**

$R'_2$  – активное сопротивление, приведенное к обмотке статора;

$X'_{2\sigma}$  – индуктивное сопротивление рассеяния, приведенное к обмотке статора;

$I'_2$  – ток, приведенный к обмотке статора;

$$S = \frac{(\phi_0 - \phi)}{\phi_0} \text{ – скольжение;} \quad (5.1)$$

$$\phi_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{z_p} \text{ – синхронная скорость;} \quad (5.2)$$

$\omega$  – угловая скорость ротора;

$z_p$  – число пар полюсов;

$f_1$  – значение частоты напряжения переменного тока, подводимого к обмотке статора;

$E_m$  – ЭДС от главного магнитного потока машины;

$E'_2$  – ЭДС обмотки, приведенная к обмотке статора.

Для схемы замещения, представленной на рисунке 5.4, соответствуют основные уравнения асинхронного двигателя (5.3-5.5):

$$\bar{U}_1 j - \bar{E}_m - j \cdot X_{1\sigma} \cdot \bar{I}_1 - R_1 \cdot \bar{I}_1 = 0; \quad (5.3)$$

$$\bar{E}_m + j \cdot X'_{2\sigma} \cdot \bar{I}'_2 + \frac{R'_2 \cdot \bar{I}'_2}{s} = 0; \quad (5.4)$$

$$\bar{I}_1 + \bar{I}'_2 - \bar{I}_0 = 0. \quad (5.5)$$

Векторная диаграмма токов, ЭДС и напряжений, удовлетворяющая системе уравнений (5.3-5.5), изображена на рисунке 5.5.



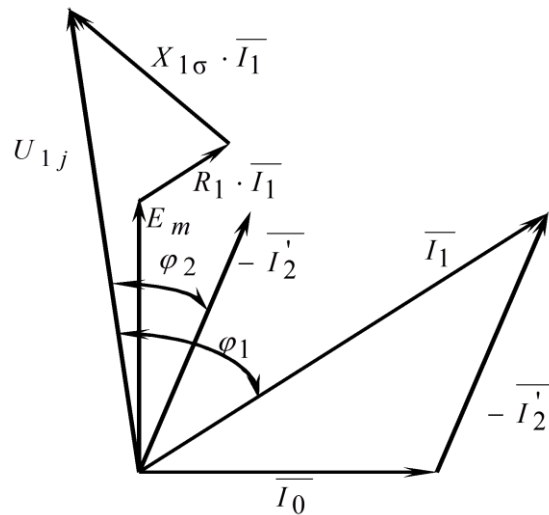


Рисунок 5.5 – Векторная диаграмма асинхронной машины

При расчетах параметров схемы замещения АД пренебрегают потерями в стали ( $R_m = 0$ ) в соответствии с методикой [64].

В качестве двигателя для управления ротором центробежного насоса имеется, как было отмечено выше, АД серии MJ225- 2-55F.

Каталожные параметры двигателя приведены в таблице [65]:

Таблица 5.2 – Каталожные параметры двигателя серии MJ225- 2-55F.

| Наименование параметра                                                        | Значение    |
|-------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| номинальная мощность $P_{\text{ном}}$                                         | 45 кВт      |
| номинальное скольжение $s_{\text{н}}$                                         | 0,01 о.е.   |
| номинальная частота вращения $n_0$                                            | 2970 об/мин |
| КПД в режиме номинальной мощности $\eta_{\text{н}}$                           | 93,7%       |
| КПД в режиме 50% нагрузки $\eta_{\text{р}^*}$                                 | 92%         |
| коэффициент мощности в режиме номинальной мощности $\cos\varphi_{\text{ном}}$ | 0,89 о.е.   |
| кратность максимального момента                                               | 2,7 о.е.    |
| кратность пускового момента                                                   | 2,3 о.е.    |
| кратность минимального момента                                                | 1 о.е.      |
| кратность пускового тока                                                      | 7 о.е.      |

|                                           |             |
|-------------------------------------------|-------------|
| коэффициент загрузки двигателя            | 0,5 о.е.    |
| число пар полюсов, p                      | 1           |
| синхронная частота вращения $n_0$         | 3000 об/мин |
| номинальное фазное напряжение $U_{1\phi}$ | 220 В       |
| номинальное напряжение сети $U_{1л}$      | 380 В       |

Каталожные данные АД позволяют определить параметры схемы замещения при следующих основных допущениях:

- магнитные и механические потери в двигателе составляют  $0,02 P_{\text{ном}}$ ;
- активные сопротивления статорной и роторной обмоток полагаются независимыми от режима работы двигателя, т.е. эффекты вытеснения не учитываются.

Ток холостого хода асинхронного двигателя определяется по формуле (5.6) [64]:

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{11}^2 - \left(p_* \cdot I_{1н} \cdot \frac{1-s_H}{1-p_*s_H}\right)^2}{1 - \left(p_* \cdot \frac{1-s_H}{1-p_*s_H}\right)^2}} \quad (5.6)$$

где  $I_{1л}$  - номинальный ток статора двигателя, А;

$I_{11}$  - ток статора двигателя при частичной нагрузке, А.

Согласно формуле (5.7) определяется номинальный ток статора двигателя:

$$I_{1н} = \frac{P_H}{3 \cdot U_{1\phi} \cdot \cos \varphi \cdot \eta_H} = \frac{45000}{3 \cdot 220 \cdot 0,89 \cdot 0,937} = 82,198 \text{ А} \quad (5.7)$$

Ток статора двигателя при частичной нагрузке рассчитывается по формуле (5.8):

$$I_{11} = \frac{p_* \cdot P_H}{3 \cdot U_{1\phi} \cdot \cos \varphi_{p_*} \cdot \eta_{p_*}} \quad (5.8)$$

где  $\eta_{p_*}$  - КПД при частичной нагрузке,

$\cos \varphi_{p_*}$  - коэффициент мощности при частичной нагрузке

$p_*$  – коэффициент загрузки двигателя.

$$I_{11} = \frac{p_{жс} \cdot P_H}{3 \cdot U_{1ф} \cdot \cos \varphi_{ржс} \cdot \eta_{нржс}} = \frac{0,5 \cdot 45000}{3 \cdot 220 \cdot 0,83 \cdot 0,92} = 44,645 \text{ А}$$

Тогда ток холостого хода составляет  $I_0=20,653 \text{ А}$ .

Синхронная угловая скорость определяется согласно (5.9):

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 50}{1} = 314,159 \frac{\text{рад}}{\text{с}} \quad (5.9)$$

Номинальная частота вращения двигателя выразим из формулы:

$$s_H = \frac{\omega_0 - \omega_H}{\omega_0} = \frac{314,159 - \omega_H}{314,159}. \quad (5.10)$$

Номинальная частота вращения определяется по формуле:

$$\omega_H = \omega_0 - s_H \cdot \omega_0 = 314,159 - 314,159 \cdot 0,01 = 311,018 \frac{\text{рад}}{\text{с}} \quad (5.11)$$

Номинальный момент двигателя равен:

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{45000}{311,018} = 144,69 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (5.12)$$

Критическое скольжение определяется из формулы Клосса при  $\beta=1$ :

$$s_k = s_H \cdot \frac{k_{max} + \sqrt{k_{max}^2 - [1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (k_{max} - 1)]}}{1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (k_{max} - 1)} \quad (5.13)$$

где  $\beta = \frac{R_1}{C_1 \cdot R'_2}$  – жесткость механической характеристики

электропривода. Её значение находится в диапазоне от  $0,6 \div 2,5$ . Принято  $\beta=1,6$ , при данном значении наблюдаются наименьшие погрешности расчета [65].

$C_1$  - конструктивный коэффициент и равен:

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1H}} = 1 + \frac{20,653}{2 \cdot 7 \cdot 82,198} = 1,018 \text{ о.е.} \quad (5.14)$$

Тогда  $s_k = 0,055 \text{ о.е.}$

Число фаз  $m=3$ .

Вспомогательный коэффициент:

$$A_1 = m \cdot U_{1ф}^2 \cdot \frac{1 - s_H}{2 \cdot C_1 \cdot k_{max} \cdot P_H} = 3 \cdot 220^2 \cdot \frac{1 - 0,01}{2 \cdot 1,018 \cdot 2 \cdot 7 \cdot 45000} = 0,581 \text{ о.е.} \quad (5.15)$$

Тогда активное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора асинхронного двигателя рассчитывается по выражению (5.16):

$$R_2' = \frac{A_1}{(\beta + \frac{1}{s_k^2}) \cdot C_1} = \frac{0,581}{\left[1,6 + \frac{1}{0,055^2}\right] \cdot 1,018} = 0,029 \text{ Ом} \quad (5.16)$$

Активное сопротивление статора обмотки рассчитывается по выражению (5.17):

$$R_1 = C_1 \cdot R_2' \cdot \beta = 1,018 \cdot 0,029 \cdot 1,6 = 0,0472 \text{ Ом} \quad (5.17)$$

Согласно формуле (5.18) определяется параметр  $\gamma$ , который позволяет найти индуктивное сопротивление короткого замыкания  $X_{кн}$ :

$$\gamma = \sqrt{\left(\frac{1}{s_k^2}\right) - \beta^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{0,055^2}\right) - 1,6^2} = 18,048 \text{ о.е.} \quad (5.18)$$

Если значение  $\gamma$  отрицательно, то необходимо изменить первоначально принятое значение  $\beta$ . В данном случае значение  $\gamma$  положительное, значит, значение  $\beta$  не подлежит корректировке.

Значение индуктивного сопротивления короткого замыкания определяется по формуле (5.19):

$$X_{кн} = \gamma \cdot C_1 \cdot R_2' = 18,048 \cdot 1,018 \cdot 0,029 = 0,532 \text{ Ом} \quad (5.19)$$

Для определения индуктивного сопротивления  $X_{кн}$  рассеяния фаз статора и ротора можно воспользоваться соотношениями, которые справедливы для серийных АД [66]. Тогда индуктивное сопротивление роторной обмотки, приведенное к статорной, будет определяться по формуле (5.20):

$$X_{2н}' = 0,58 \cdot \frac{X_{кн}}{C_1} = 0,303 \text{ Ом} \quad (5.20)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния фазы обмотки статора:

$$X_{1н} = 0,42 \cdot X_{кн} = 0,223 \text{ Ом} \quad (5.21)$$

Индуктивности статорной и роторной обмоток определяются из выражения  $X = \omega L$ , где  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$  - угловая частота питающей сети:

$$L_{2н}' = \frac{X_{2н}'}{2 \cdot \pi \cdot f} = 0,965 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} \quad (5.22)$$

$$L_{1H} = \frac{X_{1H}}{2 \cdot \pi \cdot f} = 0,711 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} \quad (5.23)$$

По найденным значениям  $C_1$ ,  $R_2'$  и  $X_{KH}$  определяется критическое скольжение

$$s_{k1} = \frac{C_1 \cdot R_2'}{\sqrt{R_1^2 + X_{KH}^2}} = 0,055 \quad (5.24)$$

Если рассчитанные значения  $s_k$  и  $s_{k1}$  не равны, то необходимо ввести поправку на  $\beta$ , значение которого может находиться в диапазоне 0,6 - 2,5.

Для того чтобы найти ЭДС ветви намагничивания  $E_1$  рассчитывается значение  $\sin \varphi_{\text{ном}}$

$$\sin \varphi_{\text{ном}} = \sin [\arccos(\cos \varphi_{\text{ном}})] = 0,456 \text{ о.е.} \quad (5.25)$$

ЭДС ветви намагничивания  $E_1$  определяется по формуле (5.26):

$$E_1 = \sqrt{(U_{1H} \cdot \cos \varphi - R_1 \cdot I_{1H})^2 + (U_{1H} \cdot \sin \varphi - X_1 \cdot I_{1H})^2} \quad (5.26)$$

$$E_1 = 225,65 \text{ В}$$

Индуктивное сопротивление намагничивания:

$$X_{\mu H} = \frac{E_1}{I_0} = \frac{225,65}{20,653} = 10,926 \text{ Ом} \quad (5.27)$$

Индуктивность ветви намагничивания:

$$L_{\mu H} = \frac{X_{\mu H}}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{10,926}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,0348 \text{ Гн} \quad (5.28)$$

После того, как определены основные параметры схема замещения, производится расчет естественных механической и электромеханической характеристик асинхронного двигателя.

Расчет естественной механической характеристики асинхронного двигателя произведен в соответствии с выражением (5.29):

$$M = \frac{m \cdot U_{1\phi}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s \cdot \left[ \left( R_1 + R_2' \cdot s^{-1} \right)^2 + \left( X_{1H} + X_{2H}' \right)^2 \right]} \quad (5.29)$$

Следовательно, выражение примет вид:

$$M = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 0,029}{314,159 \cdot s \cdot \left[ \left( 0,498 + 0,328 \cdot s^{-1} \right)^2 + \left( 0,682 + 0,93 \right)^2 \right]},$$

где  $s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}$

Построение естественной механической характеристики, представленной на рисунке 5.6, выполнено в системе *MathCad*.

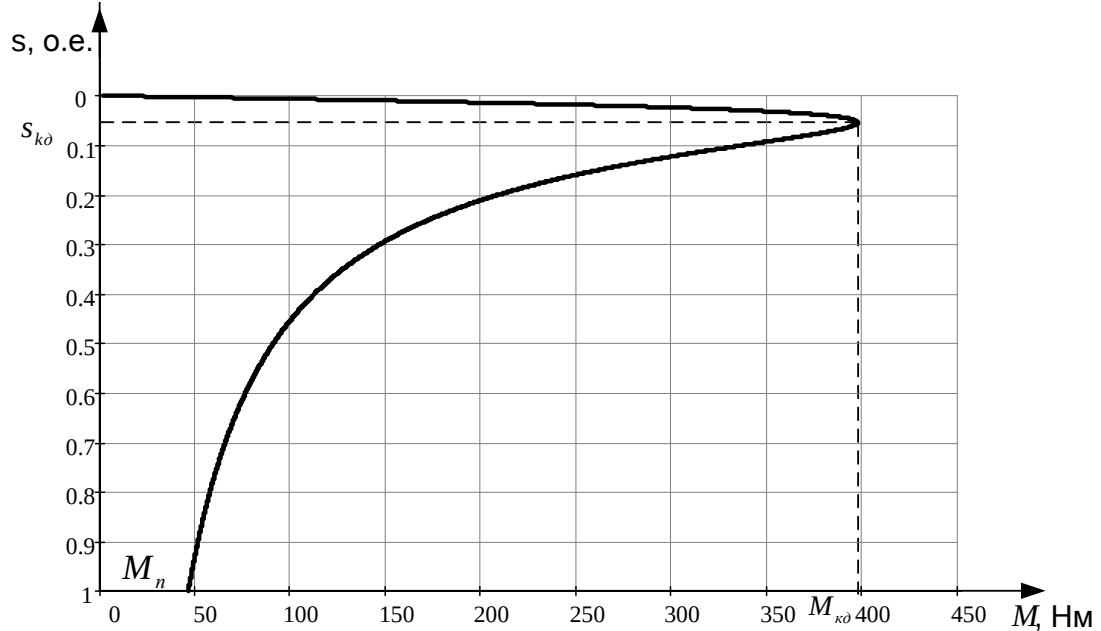


Рисунок 5.6 –Естественная механическая характеристика

При скольжениях  $0 < s < 1$  асинхронная машина работает в двигательном режиме, при  $s < 0$  в генераторном режиме параллельно с сетью (рекуперативное торможение), а при  $s > 1$  в генераторном режиме последовательно с сетью или в режиме торможения противовключением. Рассматривается только двигательный режим.

Естественная механическая характеристика имеет критический момент и критическое скольжение в двигательном режиме.

$$M_{к0} = \frac{m \cdot U_{1\phi}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot \left( R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_{кн}^2} \right)} = \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 314,159 \cdot \left( 0,0472 + \sqrt{0,0472^2 + 0,5319^2} \right)} = 397,7 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (5.30)$$

$$s_{к0} = \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + X_{кн}^2}} = \frac{0,029}{\sqrt{0,0472^2 + 0,5319^2}} = 0,0542, \quad (5.31)$$

Критическая угловая скорость находится из выражения (5.32):

$$\omega_{k0} = \omega_0 - s_{k0} \cdot \omega_0 = 314,159 - 314,159 \cdot 0,0542 = 297,13 \frac{\text{рад}}{\text{с}}. \quad (5.32)$$

Для построения естественной электромеханической характеристики необходимо определить зависимость тока ротора, приведенного к обмотке статора, от скольжения:

$$I_2' = \frac{U_{1\phi}}{\pm \sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_{кн}^2}}. \quad (5.33)$$

Следовательно, подставив значения, получим:

$$I_2' = \frac{220}{\pm \sqrt{\left(0,0472 + \frac{0,029}{s}\right)^2 + 0,5319^2}}.$$

Построение естественной электромеханической характеристики, представленной на рисунке 5.7, произведено в системе MathCad [67].

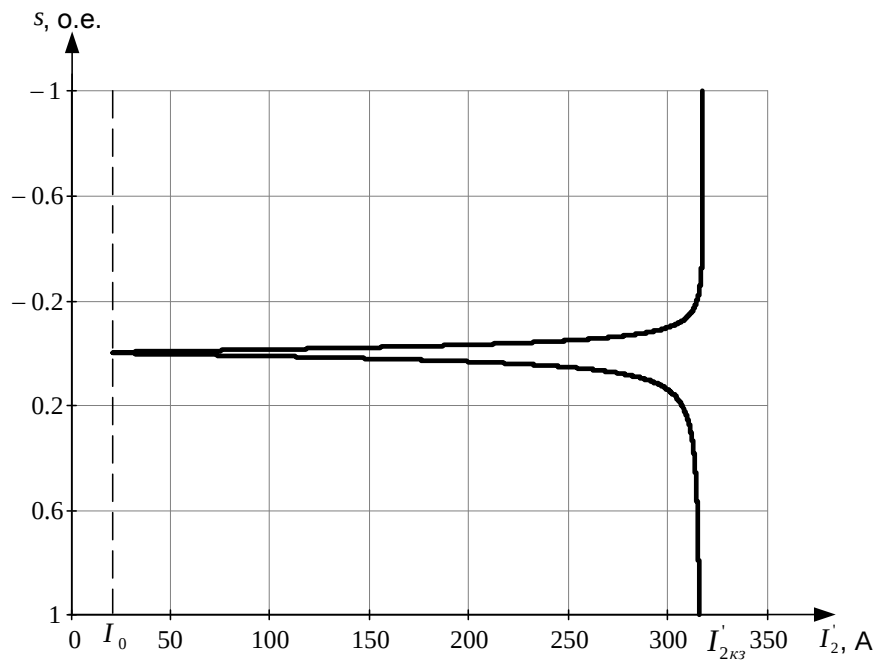


Рисунок 5.7 – Естественная электромеханическая характеристика

Ниже представлена зависимость активного и реактивного сопротивления от скольжения при прямом пуске АД в соответствии с рисунком 5.8.

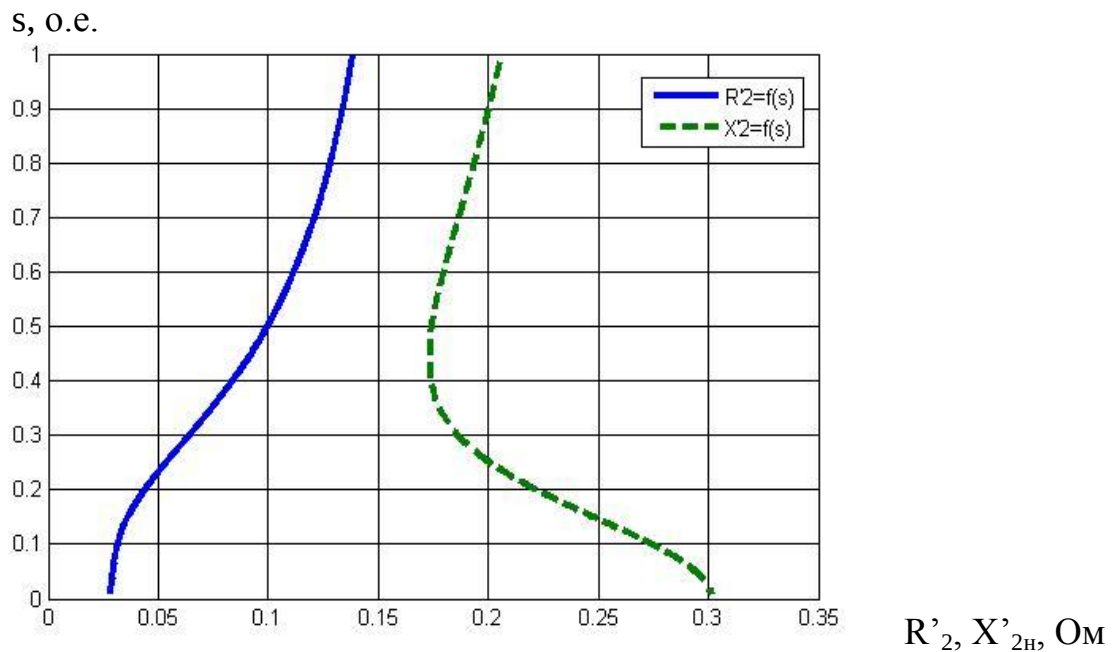


Рисунок 5.8 – Зависимость активного и реактивного сопротивлений роторной цепи в функции скольжения при прямом пуске

Результаты расчетов представлены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Параметры схемы замещения АД серии MJ225- 2-55F

| $P_{ном}, кВт$ | $I_{1н}, А$ | Параметры схемы замещения |              |                 |            |                |
|----------------|-------------|---------------------------|--------------|-----------------|------------|----------------|
|                |             | $R_1, Ом$                 | $L_{1н}, Гн$ | $L_{\mu н}, Гн$ | $R'_2, Ом$ | $L'_{2н}, мГн$ |
| 45             | 82,198      | 0,0472                    | 0,711        | 0,0348          | 0,029      | 0,965          |

Погрешность полученных при расчете параметров Т-образной схемы замещения от реальных параметров двигателя не превосходят 15% [67], что говорит об адекватности и работоспособности полученной имитационной модели двигателя с расчётными параметрами.

Имитационная модель двигателя в программной среде MatLab/Simulink приведена на рисунке 5.9.



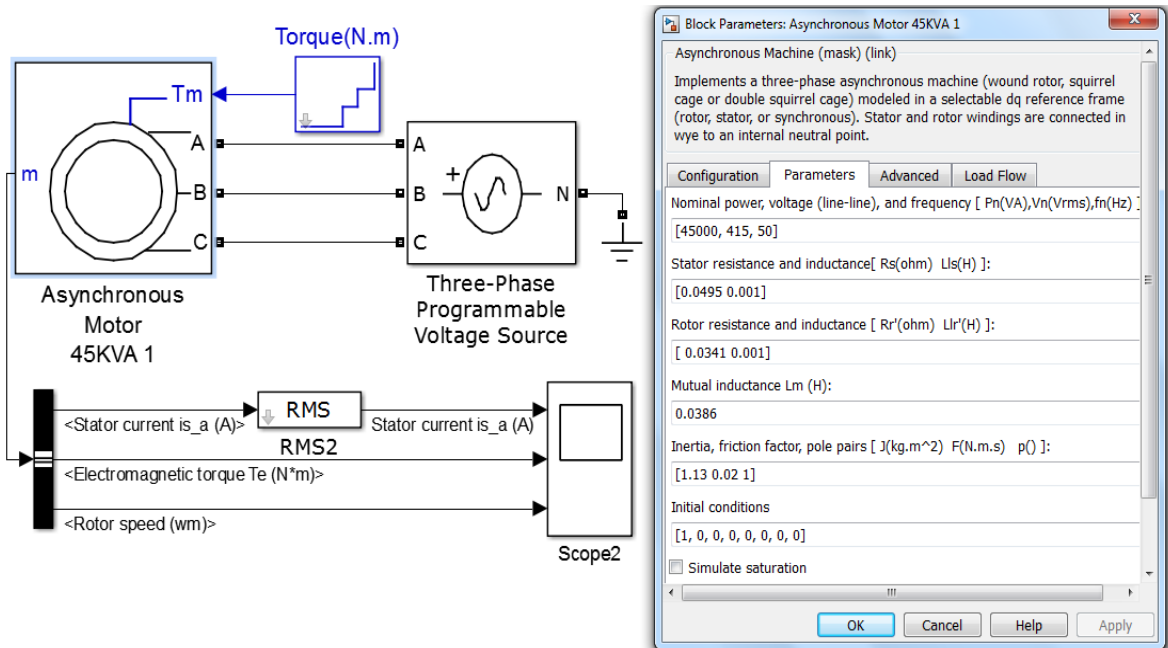


Рисунок 5.9 – Модель АД и его параметры

На рисунке 5.10 представлены временные диаграммы действующего тока в фазе A, электромагнитный момент и скорость ротора при пуске данного двигателя и дальнейшей его загрузки на 75% ( $t=5$ ) и 100% ( $t=7$ ).

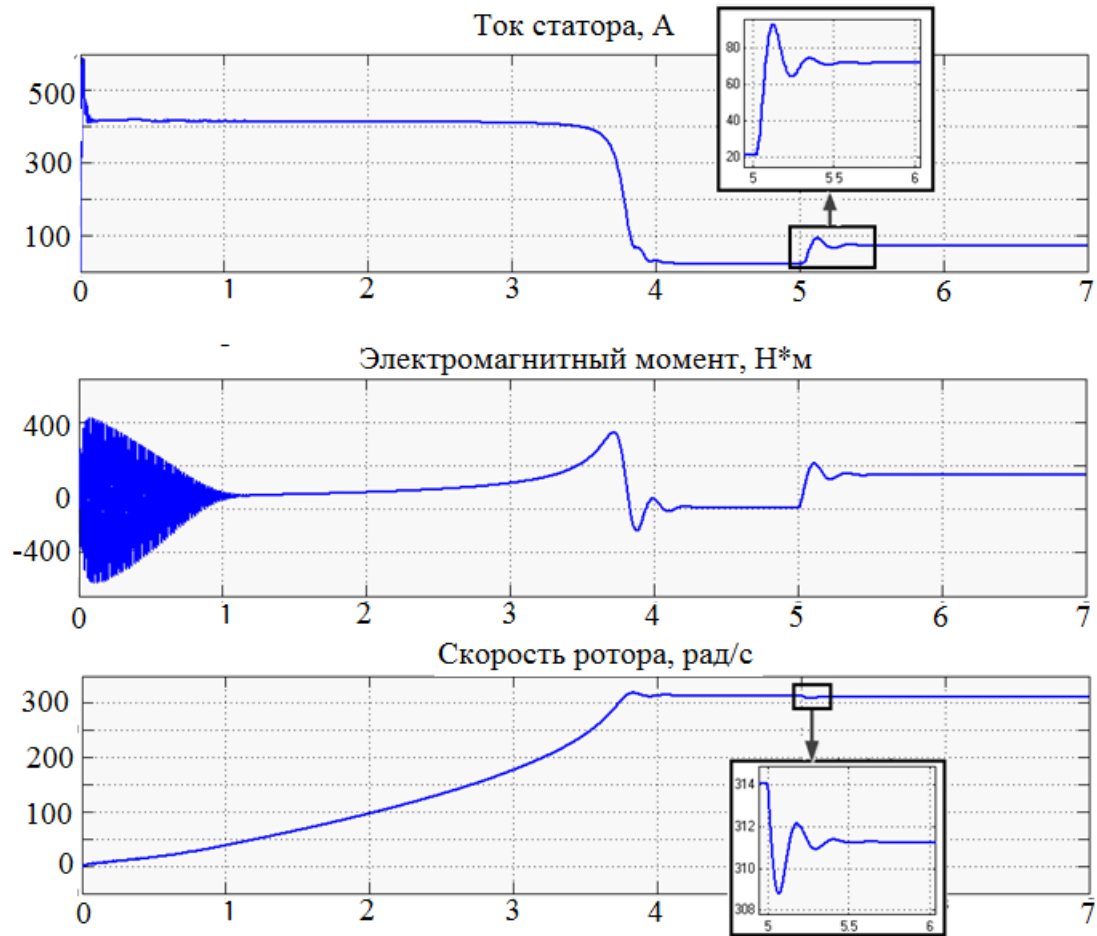


Рисунок 5.10 – Временные диаграммы пуска АД

Из осциллограмм видно, что при прямом пуске двигатель разгоняется примерно за 4 секунды. На холостом ходу скорость ротора составляет 314 рад/с (2998 об/мин), ток статора равен 22 А, электромагнитный момент равен 6 Н·м. При полной загрузки двигателя скорость ротора составляет 311 рад/с (2970 об/мин), ток статора равен 74 А, электромагнитный момент равен 151 Н·м. Пусковые ток и момент равны 512 А и 414 Н·м соответственно. Отношение пускового тока к номинальному в данном случае равен  $k_i=6,9$ , а отношение максимального момента к номинальному –  $k_m= 2,7$ . Таким образом, получена виртуальная модель электромеханического преобразователя энергии адекватно представляющего работу реального АД MJ225- 2-55F.

### 5.3 Имитационная модель насосной станции третьего подъема

Одним из основных элементов модели НС 3-го подъема является ПЧ с векторным регулированием работы двигателя насосного агрегата.

Функция контроля режима работы электрооборудования (уровень технологического процесса) возложена на систему управления ПЧ. Необходимость плавно и в широком диапазоне корректировать параметры насосной установки предлагается путем применения, например, векторного алгоритма управления [68,69]. Большое многообразие способов регулирования нацелено в первую очередь на повышение устойчивости системы, точности и глубины регулирования, на возможность работы с зашумленными информационными сигналами.

В частотном преобразователе постоянная частота питающей сети  $f_1$  преобразуется в переменную  $f_2$ , пропорционально которой изменяется частота вращения двигателя, подключенного к ПЧ.

ПЧ состоит из 3 основных элементов, представленных на рисунке 5.12.

1. Выпрямитель, который преобразует переменное напряжение сети переменного тока в пульсирующее напряжение постоянного тока;
2. Инвертор, формирующий частоту напряжения, с целью воздействия на работу двигателя;
3. Электронная схема управления, осуществляющая подачу и получение сигналов от выпрямителя, инвертора и промежуточной цепи.

Наибольшее распространение для насосных установок получили ПЧ на базе автономного инвертора напряжения (АИН) на IGBT-модулях с ШИМ и векторным алгоритмом управления асинхронным электродвигателем [68]. Главная идея векторного управления заключается в том, чтобы контролировать не только величину и частоту напряжения питания, но и фазу [70].

Роль векторного управления состоит в поддержании скорости двигателя равной входной (исходной) в установившемся режиме и обеспечении динамики во время переходных процессов.

Согласно представленной выше информации для имитационной схемы насосной станции 3-го подъема в качестве ПЧ выбран преобразователь частоты фирмы “Schneider Electric” серии Altivar 212 мощностью 60 кВт, представленный на рисунке 5.11 [71].



Рисунок 5.11 –Преобразователя частоты серии Altivar 212[72]

Преобразователь частоты “Schneider Electric” серии Altivar 212 является преобразователем частоты с улучшенными характеристиками, предназначенным для применений в секторе обслуживания: вентиляция, кондиционирование воздуха и насосы. Данный преобразователь частоты может использовать различные принципы управления двигателем, включая режим  $U/f^2$  для двигателей с «вентиляторной» нагрузкой, векторное управление с обратной связью по скорости и току [71].

В Приложении 2 представлены технические параметры выбранного преобразователя частоты.

В соответствии с рисунком 5.12 представлена модель электропривода переменного тока с векторным управлением построенная в среде *MATLAB/Simulink*. Блочная схема электропривода переменного тока содержит асинхронный короткозамкнутый двигатель, инвертор (преобразователь частоты), источник питания инвертора и схему векторного управления (регуляторы,

преобразователи координат и фаз, вычислитель частоты вращения системы координат и частоты инвертора, модели структурных элементов двигателя).

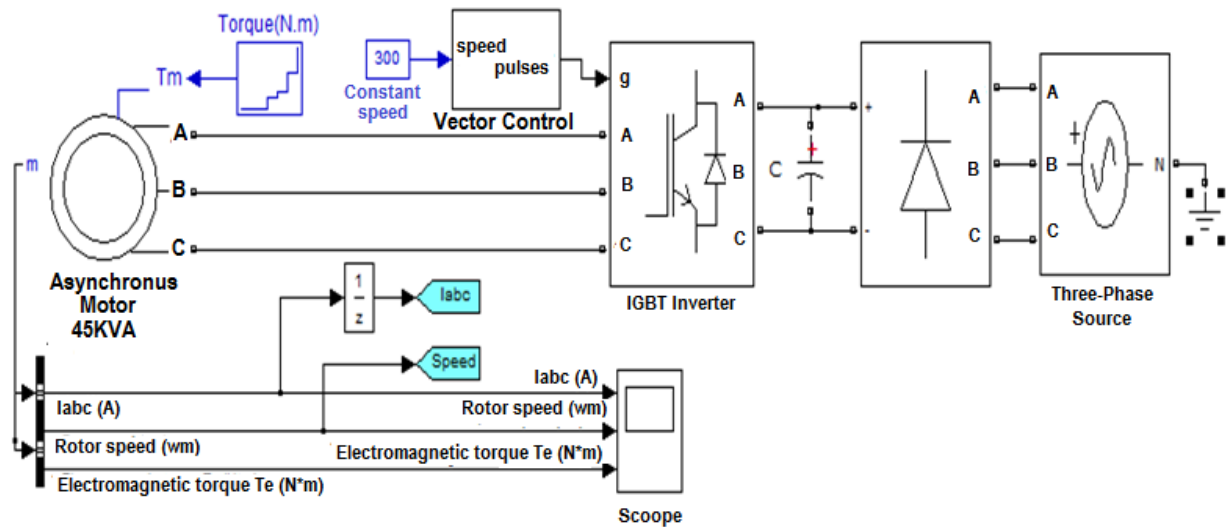


Рисунок 5.12 – Схема модели электропривода переменного тока с векторным управлением

Схема векторного управления (Vector Control) представлена на рисунке 5.13.

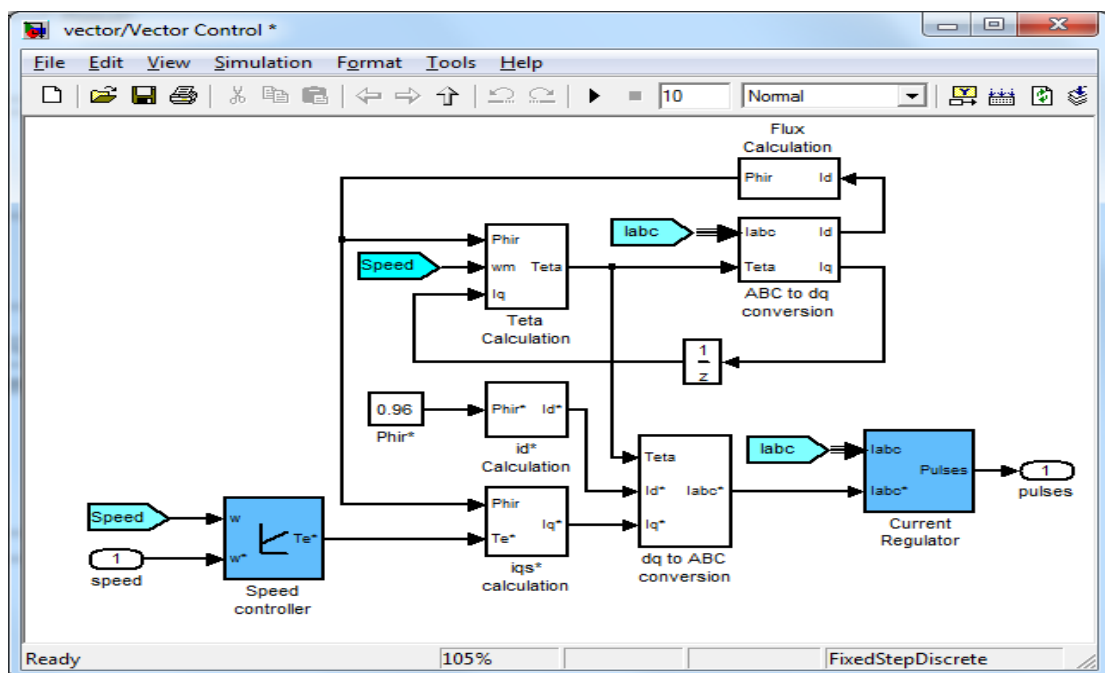


Рисунок 5.13 – Схема векторного управления

На рисунке 5.14 представлены динамические характеристики приводного механизма при векторном управлении.

На рисунке 5.15 представлены характеристики параметров работы АД в установившемся режиме работы. На рисунке приведены изменения напряжения, тока и крутящего момента двигателя. Данные сигналы получаются, при условии, что двигатель работает в номинальном режиме (крутящий момент = 151 Н·м) при скорости 300 рад / с. Полученные характеристики представлены с целью доказательства тождественности параметров и характеристик полученной виртуальной модели и реального объекта, что подтверждает адекватность полученной имитационной модели.

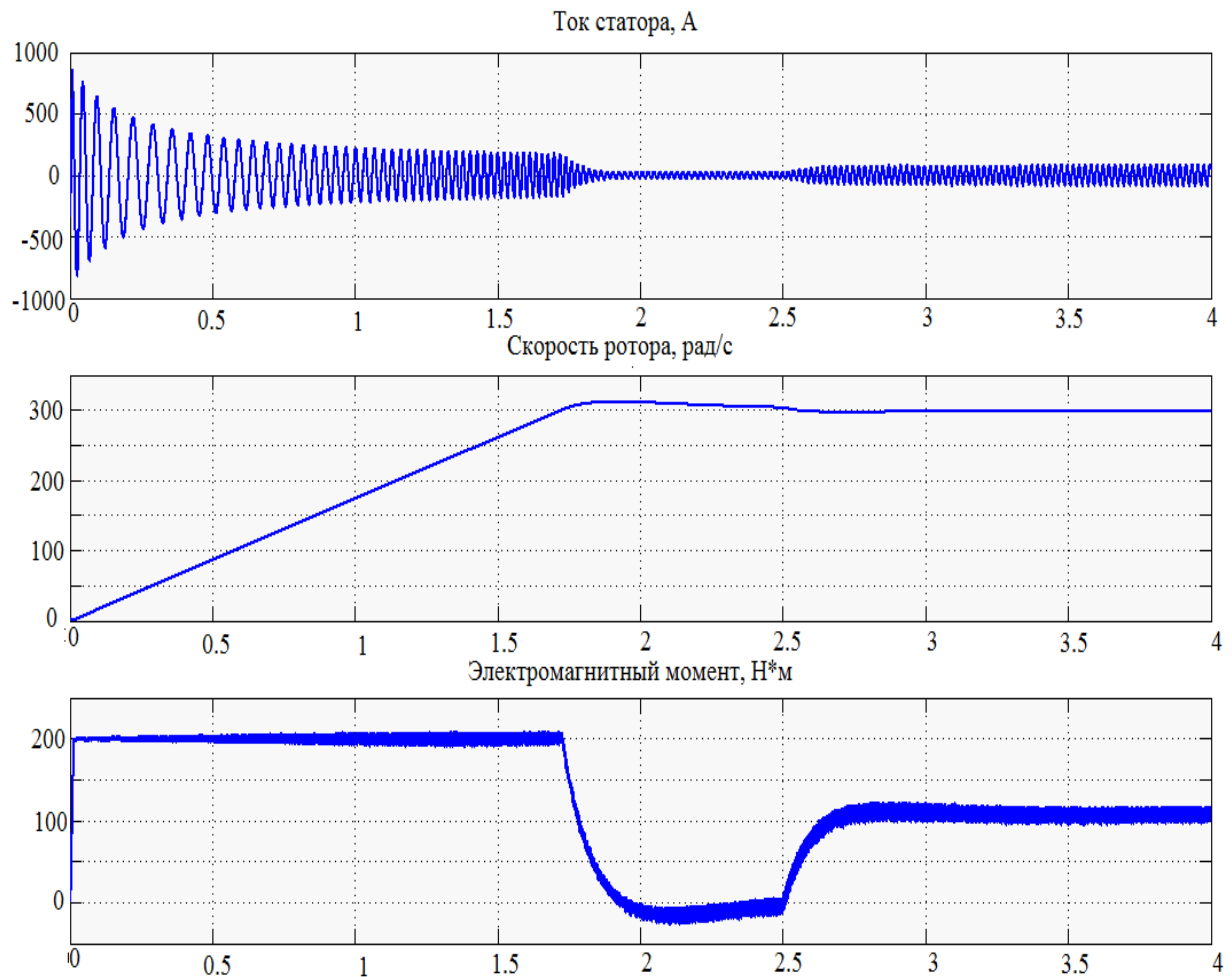


Рисунок 5.14 – Осциллограммы тока, скорости и момента при пуске и загрузки двигателя

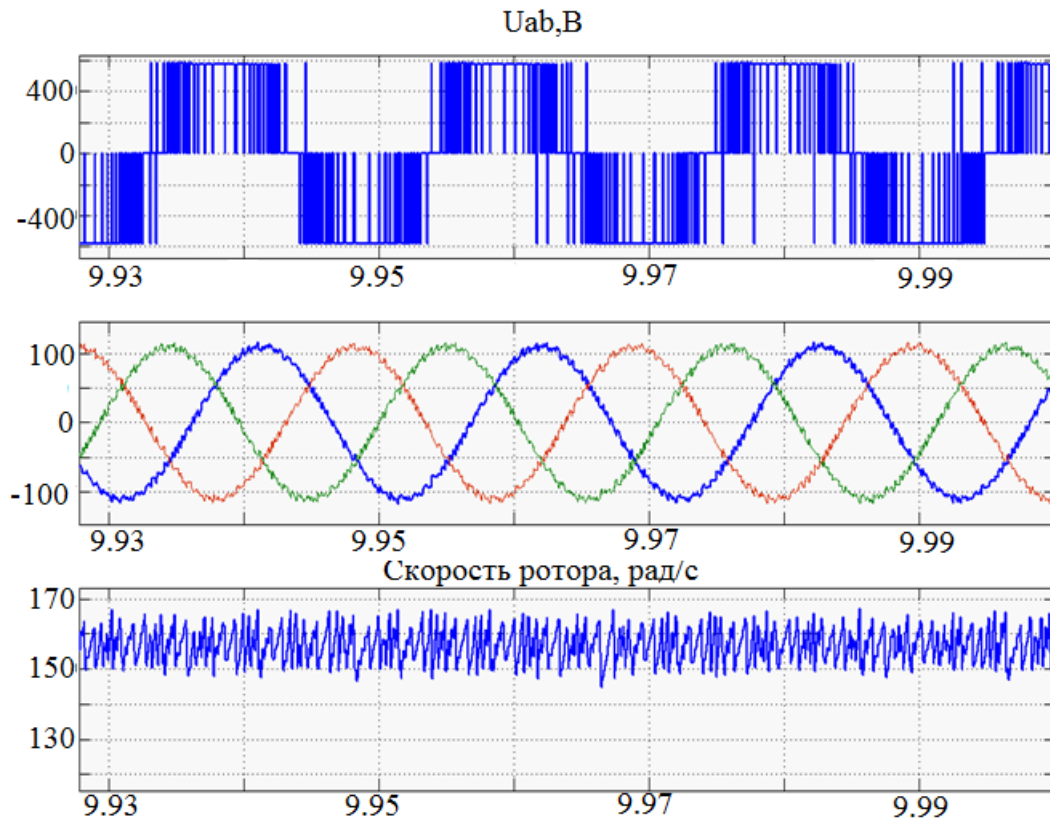


Рисунок 5.15 – Осциллограммы напряжения, тока и крутящий момент двигателя в установившемся режиме

На ПРК, как было отмечено выше, установлен насосный агрегат *Grundfos NB 80-200/211*, который представляет собой одноступенчатый центробежный насос с горизонтальным всасывающим и вертикальным напорным патрубками предназначен для циркуляции жидкости в системах отопления, кондиционирования и вентиляции. На дне корпуса насоса *Grundfos NB 80 Premium* имеется сливная пробка, а в выпускном канале имеется отверстие для подключение манометра [73]. Основные характеристики представлены в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Основные данные насоса Grundfos NB 80-200/211 Premium[73]

| Наименование показателя                 | Значение показателя |
|-----------------------------------------|---------------------|
| Частота вращения, об/мин                | 2965                |
| Номинальная подача, м <sup>3</sup> /час | 213                 |

|                                     |      |
|-------------------------------------|------|
| Номинальный напор, м                | 53,4 |
| Текущий диаметр рабочего колеса, мм | 211  |
| Уплотнение вала                     | BAQE |
| Вторичное уплотнение вала           | NONE |
| Диаметр вала, мм                    | 32   |
| Макс. рабочее давление, бар         | 16   |
| Исполнение насоса                   | A    |

Типоразмер и характеристики насоса выбираются на основании максимальных паспортных значений подачи и напора насосного агрегата, а также исходя из диапазона изменения этих показателей, формирующих расходно-напорную характеристику (поле " $Q-H$ "). На рисунке 5.16 представлена " $Q-H$ " диаграмма насоса *Grundfos NB 80-200/211 Premium*.

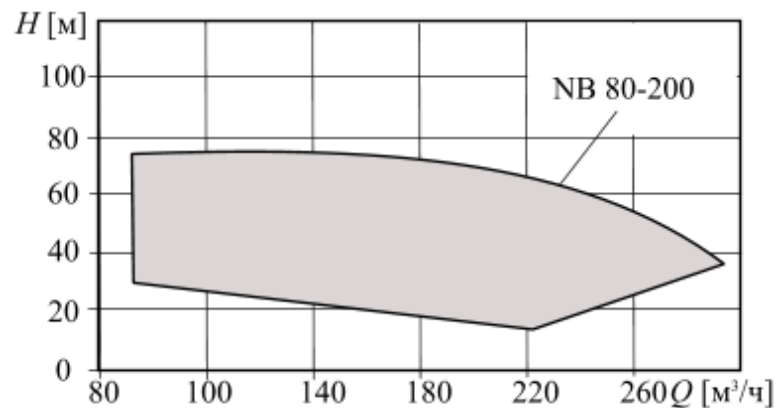


Рисунок 5.16 – Диаграмма " $Q-H$ " (расход-напор)

Исследование режима работы насосного оборудования проводится с использованием характеристик насосов и трубопроводов. В Приложении 3 представлены рабочие характеристики насоса *Grundfos NB 80-200/211 Premium*.

Сеть водоснабжения представляет собой систему трубопроводов различных по длине, диаметру, форме, и в связи с этим были приняты допущения, что потери в трубопроводе являются постоянными, а основной расход воды приходится на ПРК.

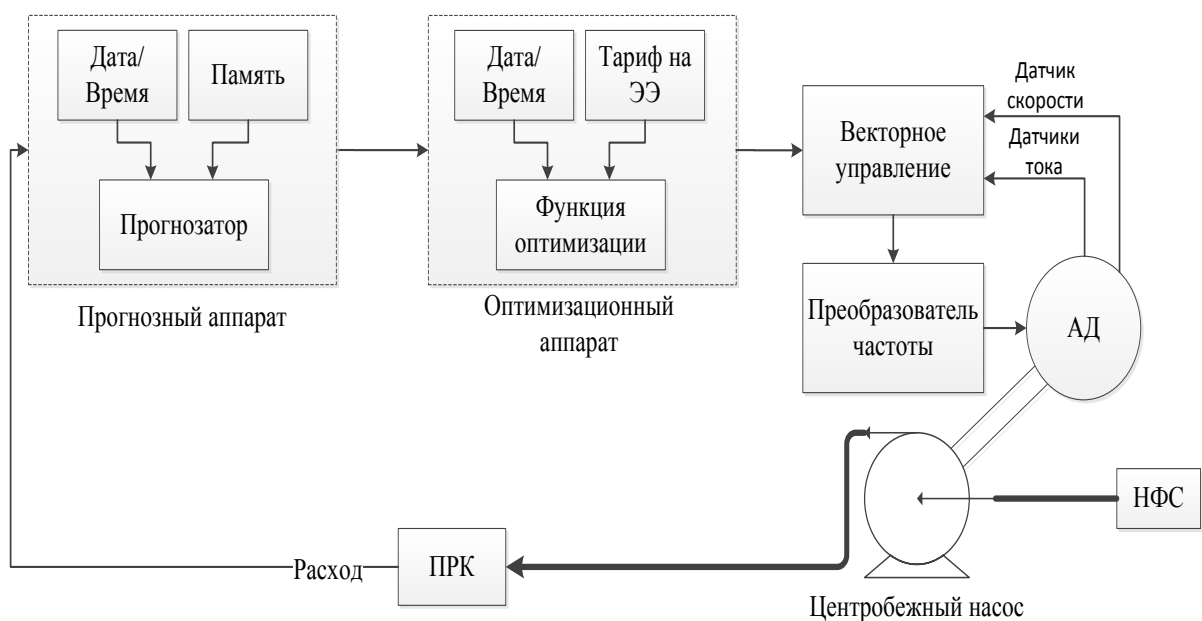
В таблице 5.5 приведены основные данные трубопроводов от водозаборной станции до НСЗ-го подъема и до ПРК.





Рисунок 5.18 – Имитационная модель насосной станции 3-го подъема

Полученный алгоритм прогнозно-оптимизационного управления представлен на рисунке 5.19.



Из рисунка 5.19 видно, что SCADA отслеживает изменения тарифной политики и выполняет прогноз уровня потребления ЭЭ, а, следовательно, и режима работы насосной станции, т.е. соотносит тариф на ЭЭ, интенсивность водопотребления на ПРК и степень наполнения резервуара. ПЧ в таком случае работает не по фактической нагрузке, а на основании нагрузки, сформированной системой SCADA.

Таким образом, в программной среде MATLAB/Simulink была полностью сформирована имитационная схема насосной станции, включая преобразователь частоты, схему его управления, систему трубопроводов технической воды, привода насосного агрегата, а также сформированы блоки прогнозной оптимизации. Объединенная модель данных объектов в соответствии с рисунком 5.18 представляет собой имитационную модель насосной станции 3-го подъема. На основании результатов расчета работы АД и АД с ПЧ можно сделать вывод, что модель достоверна, и может быть использована в дальнейших расчетах.

## **5.4 Оценка энергетической эффективности способов регулирования насосного агрегата**

### **5.4.1 Дросселирование задвижки напорной линии**

Одним из наиболее распространенных способов регулирования электрической нагрузки насосных агрегатов является регулирование задвижки на выходном патрубке насоса. На рисунке 5.20 представлена схема регулирования работы насоса путем изменения угла открытия задвижки напорной линии.

Для снижения подачи до уровня  $Q_2$  или снижения напора  $H_1$  потребитель регулирует задвижку на напорном патрубке, создавая дополнительное сопротивление. При этом суммарная характеристика системы переходит из положения 1 в положение 2. При этом потери мощности определяются исходя из площади, пропорциональной произведению величины подачи и разницы напоров до и после задвижки.

Таким образом, регулирование можно осуществлять с помощью задвижки, но только в качестве вынужденной меры для увеличения напора и смещения рабочей точки в диапазон рабочих режимов насоса. Такой способ регулирования характеризуется возможным появлением шума и вибрации в работе насосного агрегата и нагрев.

При этом все перечисленные факторы, вызванные дросселированием напорной задвижки, приводят к потерям энергии [4].

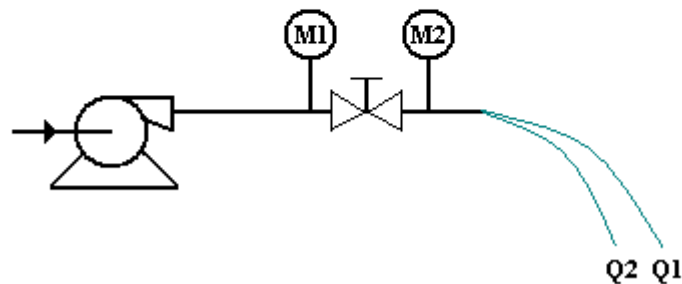
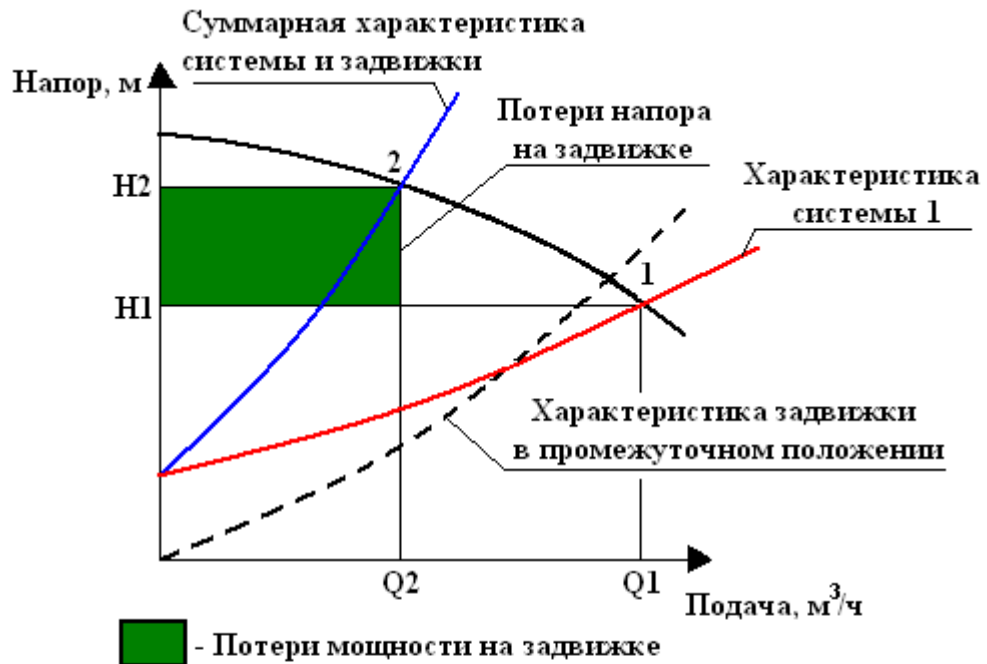


Рисунок 5.20 – Регулирование работы насоса при помощи задвижки

На основании имитационной модели насосной станции 3-го подъёма были сняты и построены характеристики напора, потребляемой мощности от подачи при дроссельном регулировании, которые представлены на рисунке 5.21.

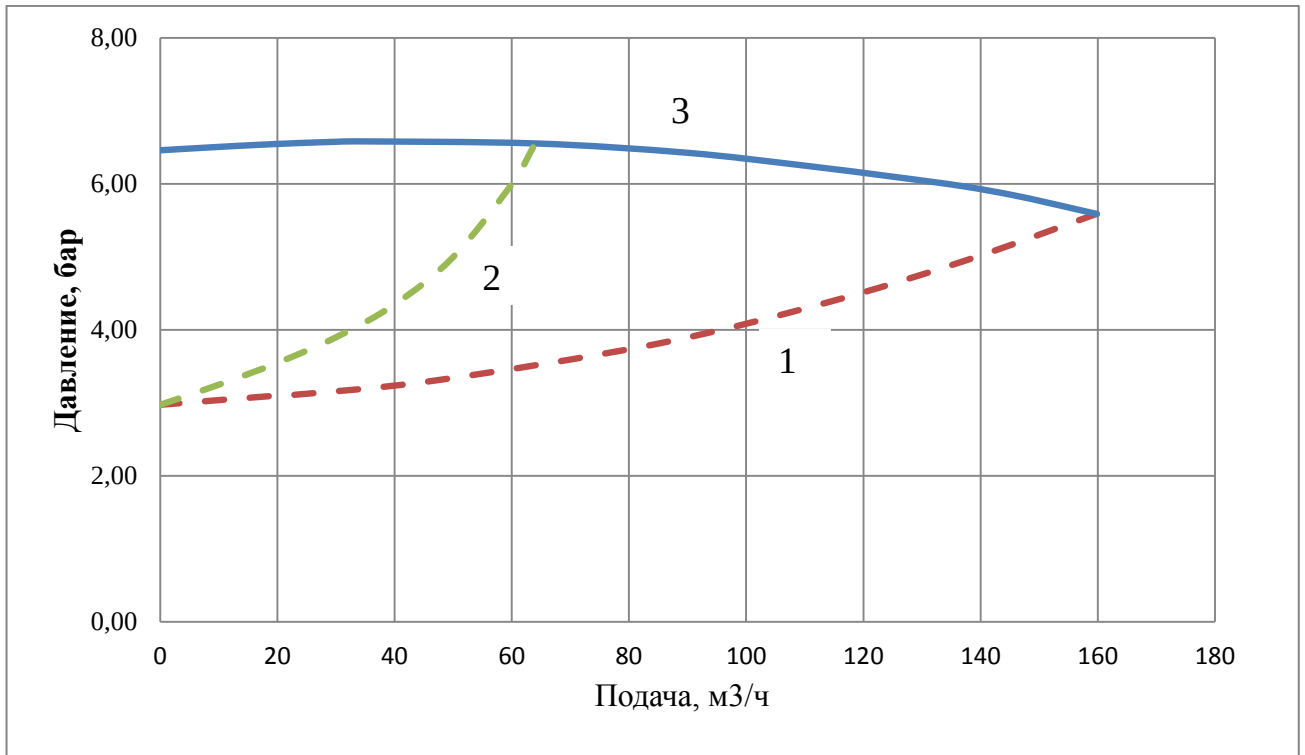


Рисунок 5.21 – Регулирование подачи воды при помощи задвижки:

- 1 - Характеристика системы при полностью открытой задвижке
- 2 - Характеристика системы при открытии задвижки на 20%
- 3- Напорная характеристика насоса

На рисунке 5.22 представлена зависимость потребляемой насосом мощности от подачи воды.

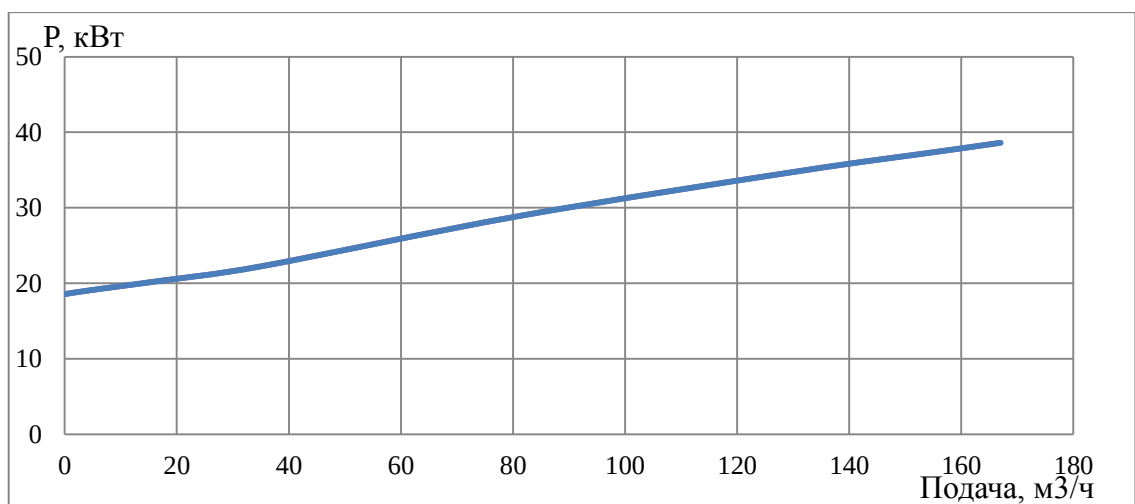


Рисунок 5.22 – Зависимость потребляемой электрической мощности насосом от подачи воды при дросселировании

Числовые значения характеристик насоса при дросселировании приведены в таблице 5.5.

Таблица 5.6 – Характеристики насоса при дросселировании

| Открытие задвижки, Т, % | Подача Q, м <sup>3</sup> /ч | Давление на выходе насоса, р, бар | Потребляемая мощность Рэл, кВт |
|-------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| 0                       | 0                           | 6,4618                            | 17,96                          |
| 1                       | 3,312                       | 6,4775                            | 18,29                          |
| 3                       | 9,9672                      | 6,508                             | 18,92                          |
| 5                       | 16,642                      | 6,536                             | 19,54                          |
| 7                       | 23,305                      | 6,5599                            | 20,17                          |
| 9                       | 29,92                       | 6,5778                            | 20,84                          |
| 10                      | 33,198                      | 6,584                             | 21,18                          |
| 20                      | 63,99                       | 6,5556                            | 25,52                          |
| 30                      | 89,79                       | 6,4286                            | 28,8                           |
| 40                      | 109,77                      | 6,2535                            | 31,06                          |
| 50                      | 125,17                      | 6,0986                            | 32,61                          |
| 60                      | 136,91                      | 5,9704                            | 33,81                          |
| 70                      | 145,41                      | 5,8492                            | 34,65                          |
| 80                      | 151,55                      | 5,7419                            | 35,24                          |
| 90                      | 156,23                      | 5,6559                            | 35,7                           |
| 100                     | 159,88                      | 5,5883                            | 36,07                          |

На основании данных Таблицы 5.6 получена диаграмма суточного потребления электрической энергии в соответствии с рисунком 5.23.

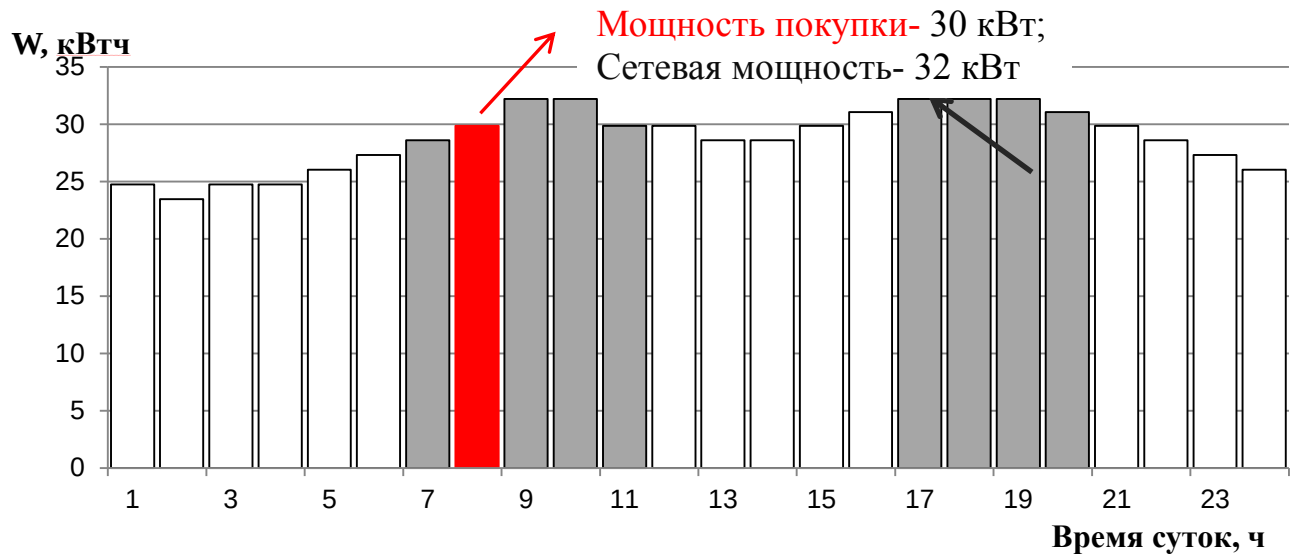


Рисунок 5.23 – Суточный график потребления электроэнергии насосом при дросселировании

Затраты на электрическую энергию потребляемую насосом за сутки при частотном регулировании, согласно приведенным в Приложении 1 тарифам [74] и определяются по формуле (5.34):

$$Z_{\text{Дсут}} = \sum_{i=1}^{24} W_i \cdot C_i + P_{\text{П}} \cdot C_{\text{П}} / 30 + P_{\text{max}} \cdot C_{\text{max}} / 30, \quad (5.34)$$

где  $W_i$  – потребляемая ЭЭ час, кВт\*ч;

$C_i$  - ставка за ЭЭ для каждого часа, руб/кВт\*ч;

$P_{\text{П}}$  - мощность покупки, оплачиваемая на оптовом рынке, кВт;

$C_{\text{П}}$  - ставка за мощность, приобретаемую потребителем, предельного уровня нерегулируемых цен, руб/кВт в месяц;

$P_{\text{max}}$  – максимальная потребляемая мощность за час в установленные часы пик, кВт;

$C_{\text{max}}$  - ставка котлового тарифа, руб/кВт в месяц [23].

Суммарное потребление электроэнергии за сутки при дроссельном управлении:

$$W_{\text{Дсут}} = \sum_{i=1}^{24} W_i = 691,147 \text{ кВтч}; \quad (5.35)$$

Суммарные суточные затраты на электроэнергию при дроссельном управлении:



$$Z_{\text{Дсум}} = 816,43 + 29,85 \cdot 264,2884 / 30 + 32,21 \cdot 707,3534 / 30 = 1838,8 \text{ руб.}$$

#### 5.4.2 Регулирование числа оборотов вала насосного агрегата

Данный способ управления заключается в использовании ПЧ для регулирования скорости вращения вала насосного агрегата.

Исполнительный элемент привода – двигатель, работает в квазиустановившемся режиме, что оказывает существенное влияние на интенсивность тепловых и электромагнитных процессов в агрегате. С целью ослабления влияния этих факторов в приводе применяют специальные асинхронные электродвигатели, рассчитанные на работу с «вентиляторной» нагрузкой, адаптированные для работы на переменной частоте. В частности, данный тип двигателя MJ225- 2-55F используется на насосной станции 3-го подъема ООО «Томскводоканалом».

При изменении частоты вращения насоса происходит изменение положения напорной характеристики насоса. Полученные напорные характеристики приведены на рисунке 5.24. Увеличение частоты вращения рабочего колеса увеличивает подачу и напор насоса, а также напор в сети. Этот способ регулирования характеризуется большей экономичностью по сравнению с дросселированием в связи с исключением потерь на задвижке[4]. Также данный способ регулирования обеспечивает согласованность параметров работы схемы водоснабжения и параметров работы самого насосного агрегата.

Потребляемая мощность электроприводом при изменении частоты сети представлена в соответствии с рисунком 5.25.

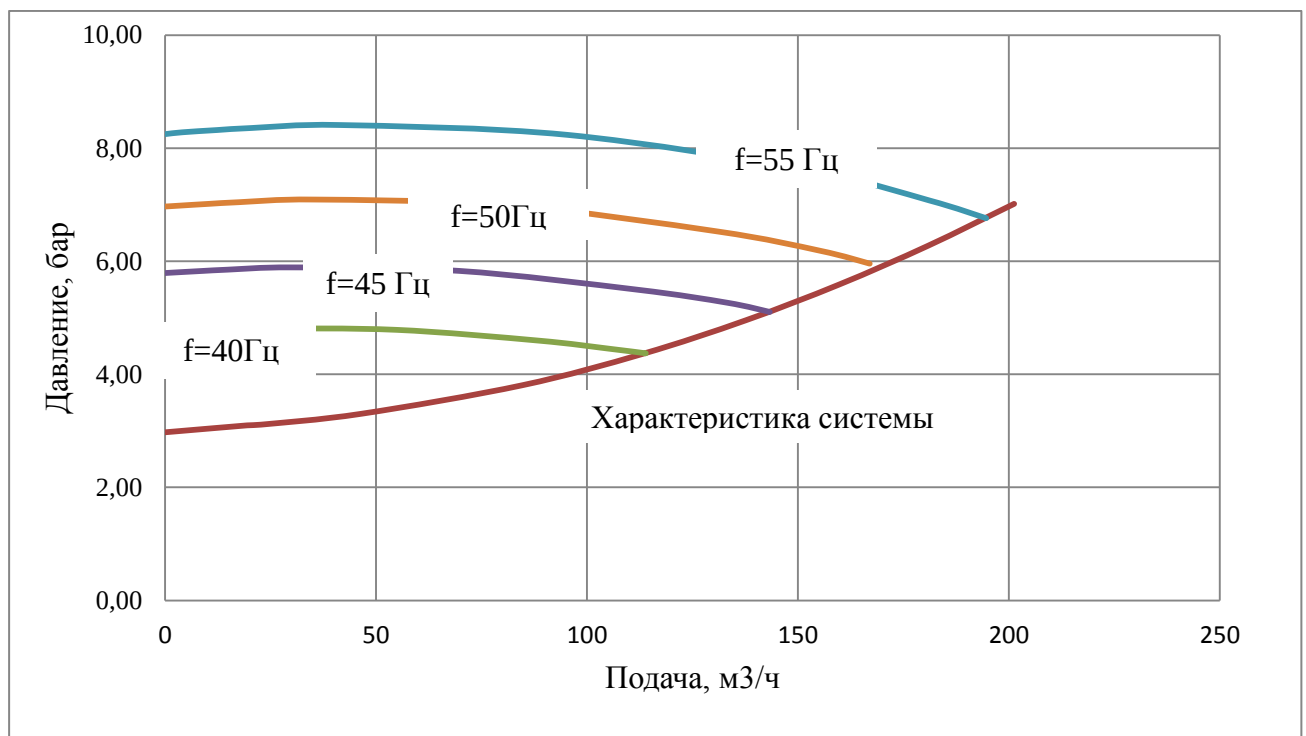


Рисунок 5.24 – Регулирование режима работы насоса путем изменения частоты сети

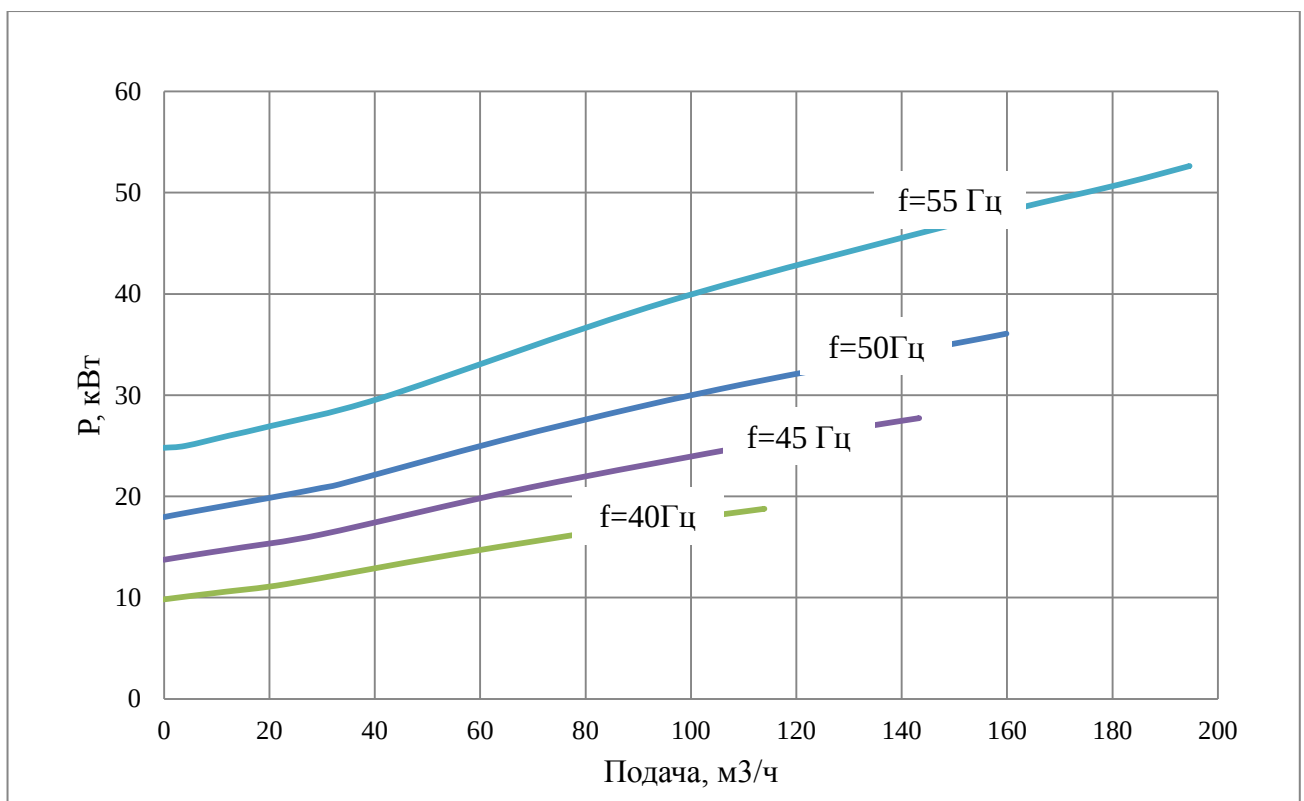


Рисунок 5.25 – Зависимость потребляемой мощности от подачи при различной частоте напряжения сети

На рисунке 5.26 представлено графическое сравнение способов регулирования, уровень эффективности частотного регулирования определяется исходя из площади фигуры ограниченной графиком (3).

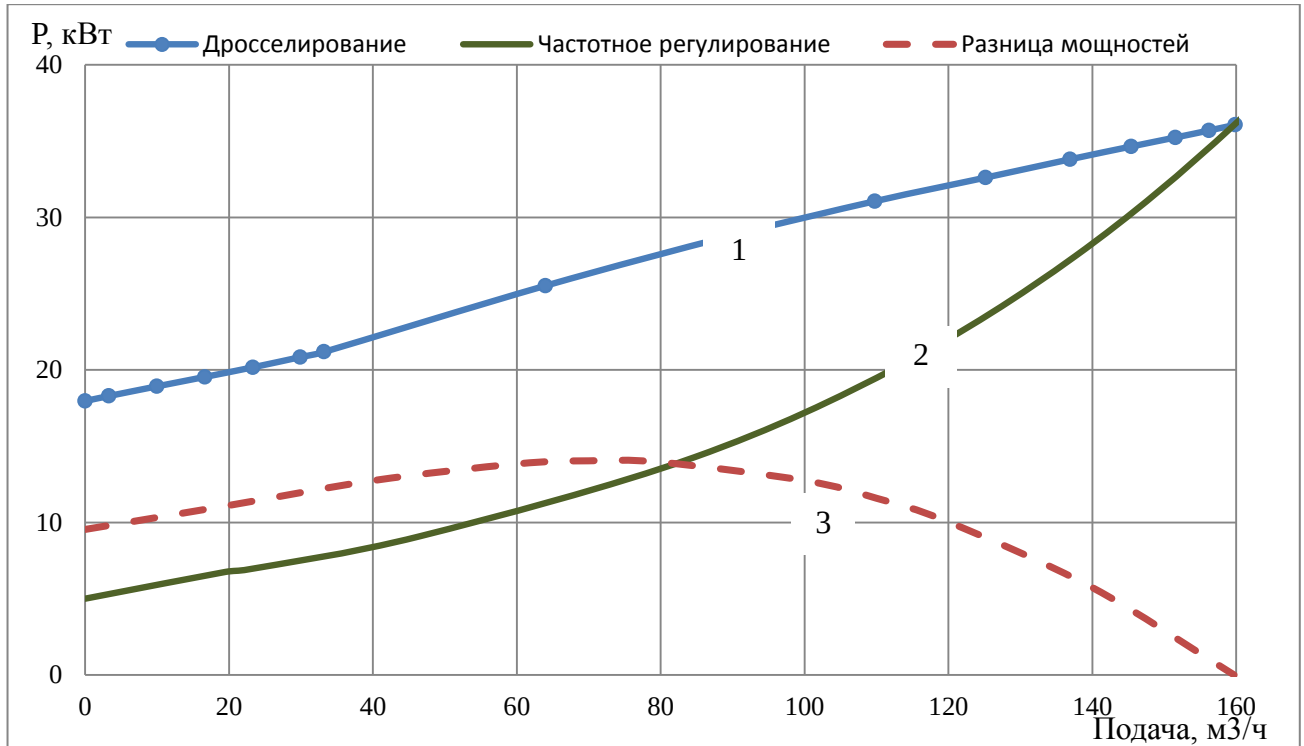


Рисунок 5.26 – Зависимости потребления мощности при дросселировании (1) и при частотном регулировании (2), разница потребляемой мощности(3)

Для сравнения уровней потребления электрической энергии и мощности при дросселировании и частотном регулировании приведен совместный график нагрузки в соответствии с рисунком 5.27.

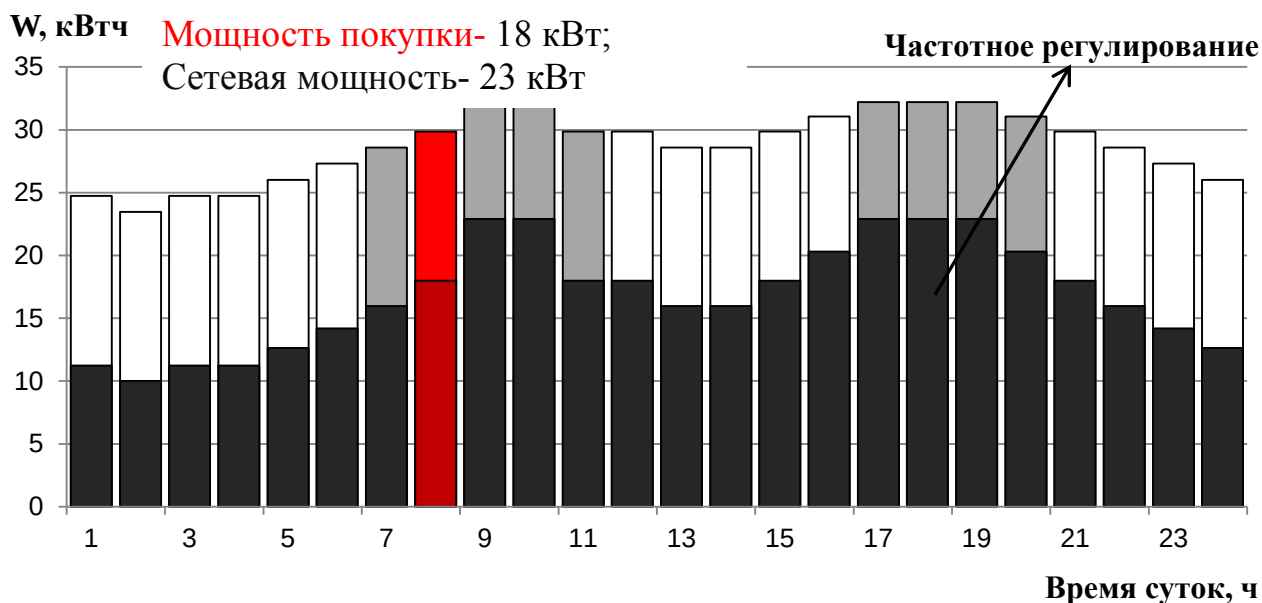


Рисунок 5.27 – Суточный график потребления электроэнергии насосом при частотном регулировании совместно с дросселированием

Из рисунка 5.27 видно, что произошло снижение уровня потребления ЭЭ в часы пиковой нагрузки (в часы ставки за мощность на оказание услуг по передаче ЭЭ), а также в отчетный час оплаты мощности на оптовый рынок.

Затраты на электрическую энергию потребляемую насосом за сутки при частотном регулировании, согласно приведенным в Приложении 1 тарифам и формуле (5.34), составляют:

$$З_{ПЧсут} = 482,13 + 17 \cdot 264,2884 / 30 + 22,9 \cdot 707,3534 / 30 = 1180,7 \text{ руб.}$$

Суммарное потребление электроэнергии за сутки при частотном управлении по формуле 5.35:

$$W_{Дсут} = \sum_{i=1}^{24} W_i = 406,37 \text{ кВтч};$$

Экономия денежных средств за сутки при частотном регулировании по сравнению с дросселированием составит:

$$Э_{ПЧ} = З_{Дсут} - З_{ПЧсут} = 1838,84 - 1180,7 = 658,14 \text{ руб.},$$

или

$$Э_{ПЧ\%} = \frac{З_{Дсут} - З_{ПЧсут}}{З_{Дсут}} \cdot 100\% = \frac{1838,84 - 1180,7}{1838,84} \cdot 100\% = 35,8\%.$$

### 5.4.3 Регулирование числа оборотов насосного агрегата с использованием оптимизации и прогноза потребления электрической энергии

Для целей учета совместного влияния на электроэффективность уровней оптимизации – технологического процесса (уровень электропривода) и производственного процесса (уровень планово-экономических показателей), создана виртуальная модель в программной среде *MATLAB*, представленная на рисунке 5.18.

Технологические процессы потребления ЭЭ (ООО «Томскводоканал») подчиняются циклическим, функциональным и случайным тенденциям [75].

Выбранные временные фреймы, исходя из принципа типичности дня недели и сезонности, поступают в блок *PredictorMATLAB* модели (рисунок 5.18) .

В качестве прогнозного аппарата, на базе которого осуществляется прогнозирования потребления электроэнергии насосной установкой, выбраны нейронные сети на основании результатов полученных в разделе 4. Точность полученного прогноза составляет 0,55% [16].

Блок *Optimizationfunction* минимизирует целевую функцию. Режим работы насосного агрегата изменяется таким образом, чтобы обеспечить минимум стоимостных затрат на приобретение ЭЭ, при обеспечении условия технологичности процесса водоснабжения технической водой ПРК [76,].

Оптимизационный аппарат представляет собой контроллер с информационной связью с блоком управления, по которому ежесуточно подаются данные о тарифах на сутки вперед.

Целью оптимизационной задачи является уменьшению затрат на электрическую энергию насосной станцией с учетом графика разбора воды, действующих тарифов и технологических требований.

Целевой функцией оптимизации, уровня предприятия, становится минимум затрат на приобретение ЭЭ при соблюдении технологичности

производства, в данном случае сумма затрат будет определяться по приведенной ниже формуле (5.35):

$$Z_{\text{ЭЭ}} = \sum_{i=1}^{24} W_i \cdot C_i + P_{\Pi} \cdot C_{\Pi} / 30 + P_{\text{max}} \cdot C_{\text{max}} / 30 + \sum_{i=1}^{24} W_i \cdot C_{\text{прочие}} + \sum_{i=1}^{24} W_i^+ \cdot C_i^+ + \sum_{i=1}^{24} W_i^- \cdot C_i^- \rightarrow \min \quad (5.35)$$

где  $W_i$  – потребляемая энергия за час, кВтч;

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

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

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

$P_{\text{max}}$  – сетевая мощность, оплачиваемая потребителем как мощность за услуги передачи ЭЭ, кВт (определяется как максимальная мощность из плановых часов пиковой нагрузки утвержденных администратором торговой системы в зависимости от ценовой зоны потребителя);

$C_{\text{max}}$  – 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.

При расчете по данной формуле предполагается, что объект водоснабжения рассчитывается по 6 ЦК, которая учитывает стоимость отклонений.

При решении данной задачи необходимо учесть следующие ограничения:

- Суммарная поданный объем воды за сутки должна совпадать с суммарным расходом за сутки.

$$\sum_{i=1}^{24} V_i = \sum_{i=1}^{24} V_{Pi}, \quad (5.36)$$

где  $V_{Pi}$ – потребляемый объем воды в  $i$ -час;

$V_i$ – закачанный объем воды в  $i$ -час

- Объем поданной воды в  $i$ -ый час должен быть равен либо больше разности объемов потребленной воды в  $i$ -ый час и остатков воды за предыдущие часы

$$V_i \geq V_{Pi} - (V_{i-1} - V_{Pi-1}), \quad (5.37)$$

- Изменение объема воды в аккумулирующем резервуаре должен лежать например в пределах от  $600 \text{ м}^3$  до  $800 \text{ м}^3$
- Подача воды не может быть отрицательной.

Так как связь между объемом воды и подачей имеет вид  $V = Q \cdot T$ , а временной шаг имеет границу в 1 час, то можно перейти от единиц объема к единицам подачи воды  $Q_i$ . Для построения оптимизационной функции необходимо знать зависимость потребляемой мощности от подачи воды реальной системы водоснабжения. Поэтому на основании математической модели НС 3-го подъема были сняты следующие данные, приведенные в таблице 5.7.

Таблица 5.7 – Характеристики насосной станции при частотном регулировании

| Скорость вала<br>$\omega$ , рад/с | Подача<br>$Q$ , м <sup>3</sup> /ч | Давление на<br>выходе насоса,<br>$p$ , бар | Потребляемая<br>мощность<br>$P_{эл}$ , кВт |
|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|
| 190                               | 0                                 | 2,97                                       | 5                                          |
| 191                               | 19,44                             | 3,10                                       | 6,75                                       |
| 191,5                             | 22,68                             | 3,11                                       | 6,92                                       |
| 200                               | 46,59                             | 3,30                                       | 9,1                                        |
| 225                               | 84,66                             | 3,81                                       | 14,27                                      |
| 250                               | 113,34                            | 4,37                                       | 20,3                                       |
| 275                               | 137,622                           | 4,96                                       | 27,46                                      |
| 300                               | 159,792                           | 5,59                                       | 36,1                                       |
| 325                               | 180,87                            | 6,28                                       | 46,3                                       |

На основании массивов данных подачи  $Q$  и потребляемой мощности  $P_{эл}$  построим уравнение регрессии в программной среде *MathCAD*. Наиболее достоверной будет полиномиальная регрессия третьего порядка:

$$P_{эл}(Q) = (4,62 \cdot 10^{-6}) \cdot Q^3 + (1,657 \cdot 10^{-5}) \cdot Q^2 + 0,07317 \cdot Q + 5,15 \quad (5.38)$$

коэффициент детерминации, которого  $R^2=99,999\%$  и стандартное отклонение равно 0,088.

Часовое потребление энергия определяется из выражения (5.39):

$$W_i = P_{эл_i}(Q_i) \cdot T_i \quad (5.39)$$

Решить данную задачу можно различными методами оптимизации нелинейных задач, наиболее распространённым среди математических программ является метод обобщенного приведенного градиента (ОПГ) [84].

Метод обобщенного приведенного градиента основан на сокращении размерности задачи с помощью представления всех переменных через множество независимых переменных. Метода ОПГ заключается в сокращении размерности задачи путем исключения зависимых переменных и дальнейшего применения метод приведенного градиента в качестве критерия при установлении оптимальности решения задачи оптимизации.



Данная оптимизационная функция решается с использованием специализированных средств программной среды MS Excel и встроенного в него метода ОПГ путем нахождения экстремума функционала оптимизации [77].

При использовании резервуара воды и внедрении блока оптимизации происходит изменение объемов потребления технической воды в соответствии с рисунком 5.28.

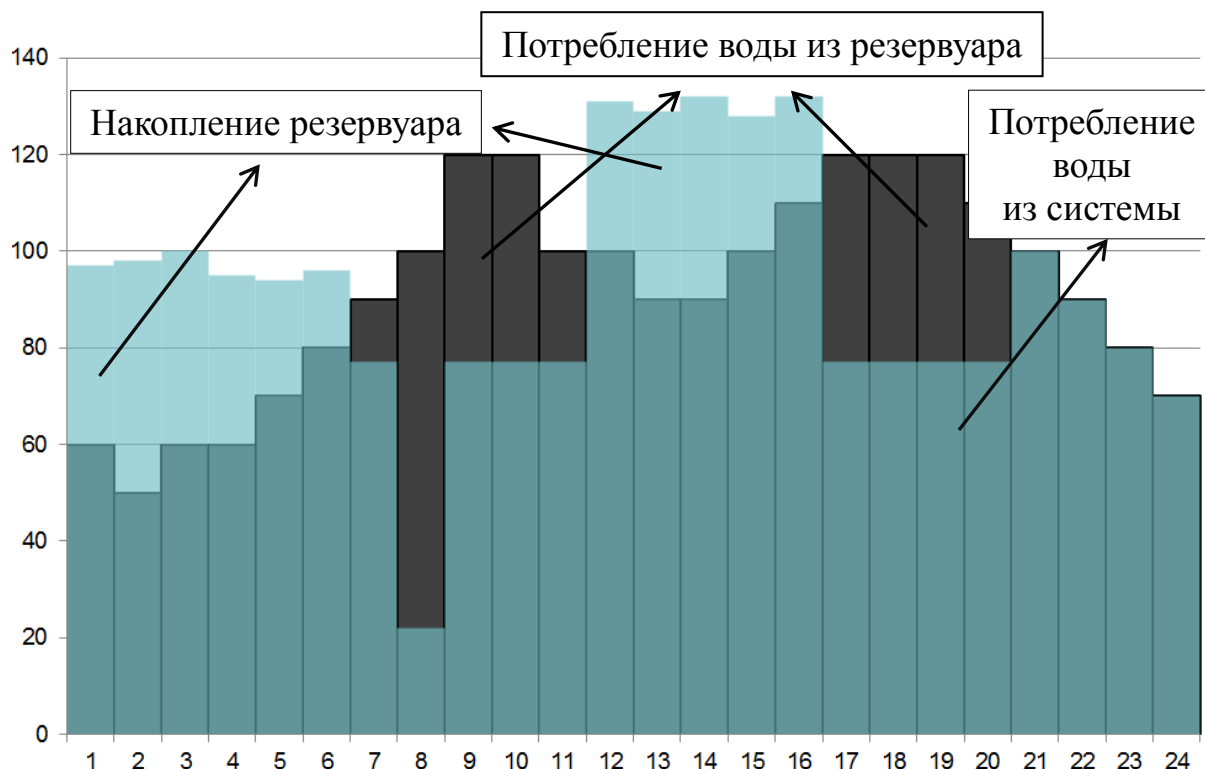


Рисунок 5.28 – График водопотребления при прогнозной оптимизации

При таком способе регулирования

- 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.

Полученные результаты подтверждает совместный график нагрузки при частотном регулировании и при регулировании с прогнозной оптимизацией, представленный на рисунке 5.29.

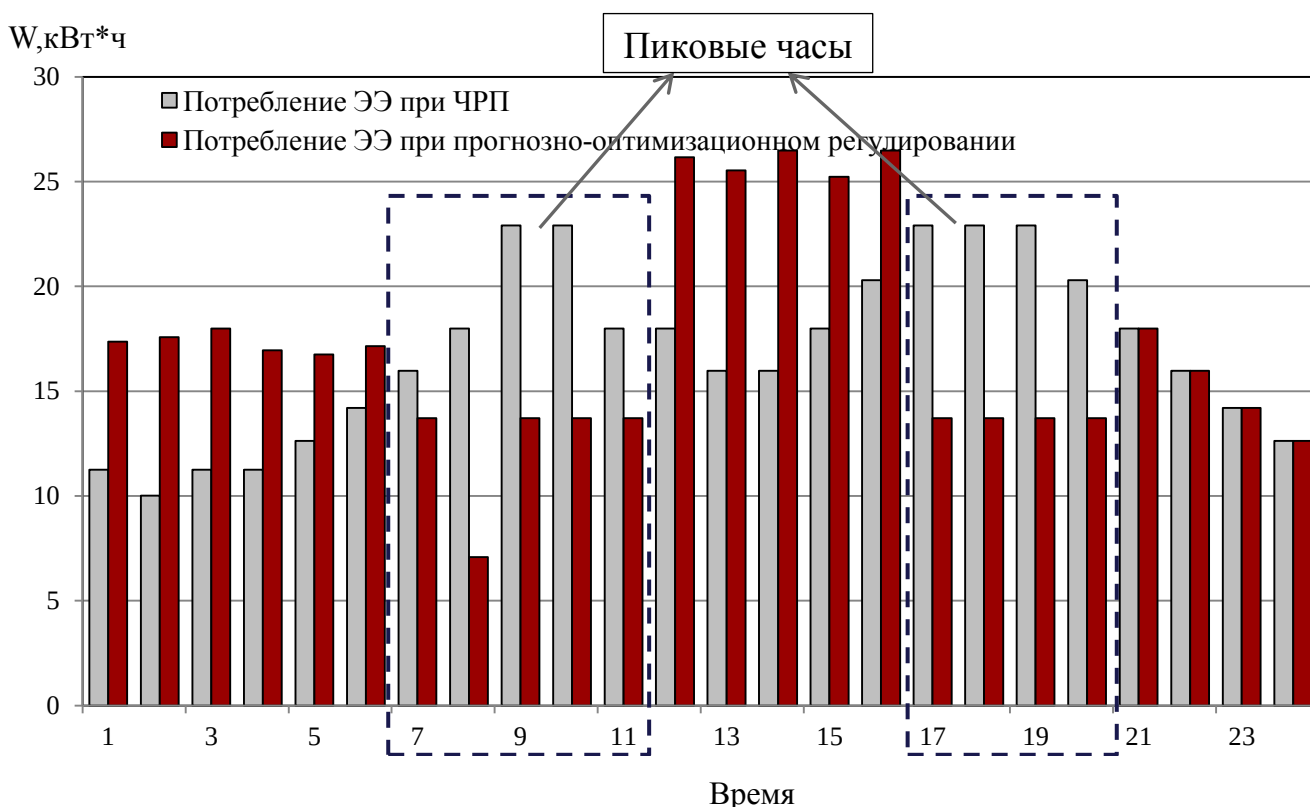


Рисунок 5.29 – Графики электрической нагрузки по прогнозной оптимизации и при частотном регулировании

Для подтверждения полученной экономической эффективности прогнозно-оптимизационного регулирования приведены совместные зависимости стоимости потребленной ЭЭ и мощности от времени суток в соответствии с рисунком 5.30.

Из графика видно, что в часы максимума стоимости ЭЭ и пикового значения стоимости мощности (8.00) производится изменение нагрузки за счет блока оптимизации и в данные интервалы времени потребитель платит гораздо меньше за потребленную электроэнергию, чем раньше.

Например, ранее стоимость ЭЭ при классическом управлении насосным агрегатом с ЧРП для 8.00 часа составляла 21,67 р и для всего графика нагрузки стоимость мощности покупки составляла 158 рублей, а сетевой мощности 540 руб. При внедрении ЧРП с оптимизацией и прогнозированием стоимость ЭЭ для 8.00 часа составила 8,52 руб (снижение стоимости на 61 %), значение мощности покупки- 62,32 руб (снижение стоимости на 60,6%), значение сетевой мощности- 323,12 руб (снижение стоимости на 40%) [74].

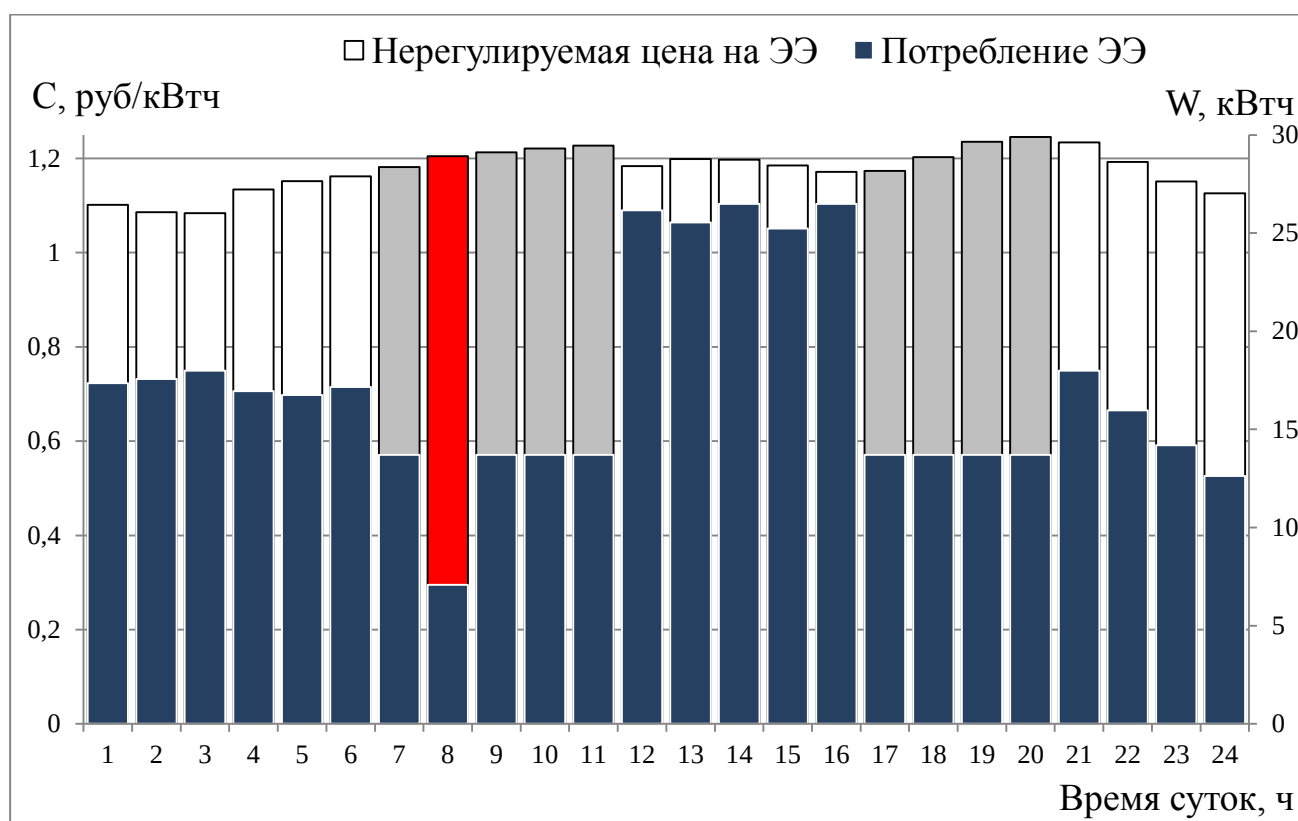


Рисунок 5.30 – Суточный график потребления ЭЭ и тарифной ставки

При использовании блока оптимизации и прогнозного аппарата, полная стоимость потребления ЭЭ составляет:

$$Z_{ПЧ+Прог} = 482,29 + 5,63 \cdot 264,2884 / 30 + 14,36 \cdot 707,3534 / 30 = 870,58 \text{ руб}$$

Суммарное потребление электроэнергии за сутки при использовании оптимизационного аппарата и прогноза потребления:

$$W_{Дсут} = \sum_{i=1}^{24} W_i = 411,2 \text{ кВтч}$$

Экономия денежных средств за сутки при частотном регулировании с прогнозированием по сравнению с частотным регулированием составит [76, 78-79]:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{ПЧ+Прог} &= \mathcal{Z}_{ПЧсут} - \mathcal{Z}_{ПЧ+Прог} = 1180,7 - 870,58 = 310,12 \text{ руб или} \\ \mathcal{E}_{ПЧ+Прог\%} &= \frac{\mathcal{Z}_{ПЧсут} - \mathcal{Z}_{ПЧ+Прог}}{\mathcal{Z}_{ПЧсут}} \cdot 100\% = \frac{1180,7 - 870,58}{1180,7} \cdot 100\% = 26,3\%. \end{aligned}$$

#### 5.4.4 Регулирование нагрузки по закону повторно-кратковременного режима

Так же можно рассмотреть режим работы насоса по закону повторно-кратковременного режима, т.е. включать насос в номинальном режиме и отключать. В таком случае можно отказаться от преобразователя частоты, а ограничиться лишь устройствами плавного пуска. Привод насоса (АД), рассчитанный на определенную частоту питающей сети, в данном случае будет работать с максимальным КПД. Учитывая тарифные ставки на ЭЭ можно оптимизировать работу насоса сведя к минимуму затрат на ЭЭ.

Целевая функция при регулировании по закону повторно-кратковременного режима выглядит аналогично регулированию частоты вращения насоса с использованием оптимизационной функции и прогноза потребления (5.35).

Различия состоят в ограничениях при решении данной задачи:

- Суммарная поданный объем воды за сутки должна совпадать либо превышать суммарный расход за сутки.

$$\sum_{i=1}^{24} V_i \geq \sum_{i=1}^{24} V_{\Pi i}, \quad (5.40)$$

где  $V_{\Pi i}$  – потребляемый объем воды в  $i$ -час;

$V_i$  – закачанный объем воды в  $i$ -час.

- Объем поданной воды в  $i$ -ый час должен быть равен либо больше разности объемов потребленной воды в  $i$ -ый час и остатков воды за предыдущие часы.

$$V_i \geq V_{\Pi i} - (V_{i-1} - V_{\Pi i-1})_i \quad (5.41)$$

- Изменение объема воды в аккумулирующем резервуаре должен лежать, например, в пределах от  $600 \text{ м}^3$  до  $800 \text{ м}^3$ .
- Подача воды не может быть отрицательной.
- Минимальное время работа насоса принимается равным 20 минут. Данный интервал времени выбран в связи с недопустимостью частых отключений/включений, так как частые отключения насосной установки приводят к снижению надежности работы установки, увеличению ремонтов привода насосной установки, повышению возможности гидроударов в системе, а также увеличение потребления ЭЭ за счет пусковых токов, возникающих при каждом запуске привода насосной установки.

При электроснабжении привода уровнем номинальной частоты (50 Гц) производительность насоса в реальной системе водоснабжения будет  $Q=160 \text{ м}^3/\text{ч}$ , потребляемая мощность при этом  $P= 36,1 \text{ кВт}$  (данные в соответствии таблицы 5.7). Максимум графика расхода воды составляет  $120 \text{ м}^3/\text{ч}$ , следовательно, насос взят с большим запасом, что приводит к большему расходу ЭЭ. Так как связь между объемом воды и подачей имеет вид  $V = Q \cdot T$ , а временной шаг имеет границу в 1 час, то можно перейти от единиц объема к единицам подачи воды  $Q_i$ . Для построения оптимизационной функции необходимо знать зависимость потребляемой мощности от подачи воды реальной системы водоснабжения.

Решение данной оптимизационной задачи возможно аналогичным путем с использованием метода ОПГ, как представлено в разделе 5.4.3.

Затраты на ЭЭ потребляемую насосом за сутки при регулировании по повторно-кратковременному режиму работы с использованием оптимизационной

функции и прогноза потребления ЭЭ, согласно приведенным в Приложении 1 тарифам, и формуле (5.35):

$$З_{ПЧ+ШИМ} = 593,43 + 0 \cdot 264,2884 / 30 + 24,062 \cdot 707,3534 / 30 = 1160,79 \text{ руб}$$

Суммарное потребление электроэнергии за сутки при использовании оптимизационного аппарата и прогноза потребления:

$$W_{\text{Дсут}} = \sum_{i=1}^{24} W_i = 505,31 \text{ кВтч}$$

Экономия денежных средств за сутки при данном способе регулирования с использованием оптимизационной функции и прогноза потребления, по сравнению с частотным регулированием составит:

$$\mathcal{E}_{ПЧ+ШИМ} = З_{ПЧ\text{сут}} - З_{ПЧ+ШИМ} = 1180,7 - 1160,8 = 19,9 \text{ руб}$$

или

$$\mathcal{E}_{ПЧ+Прог\%} = \frac{З_{ПЧ\text{сут}} - З_{ПЧ+Прог}}{З_{ПЧ\text{сут}}} \cdot 100\% = \frac{1180,7 - 1160,8}{1180,7} \cdot 100\% = 1,7\%$$

Как видно из результатов данный метод экономически не выгоден, т.к. процент экономии денежных средств сравним с погрешностью.

На рисунке 5.31 представлен суточный график расхода воды при повторно-кратковременном режиме работы:

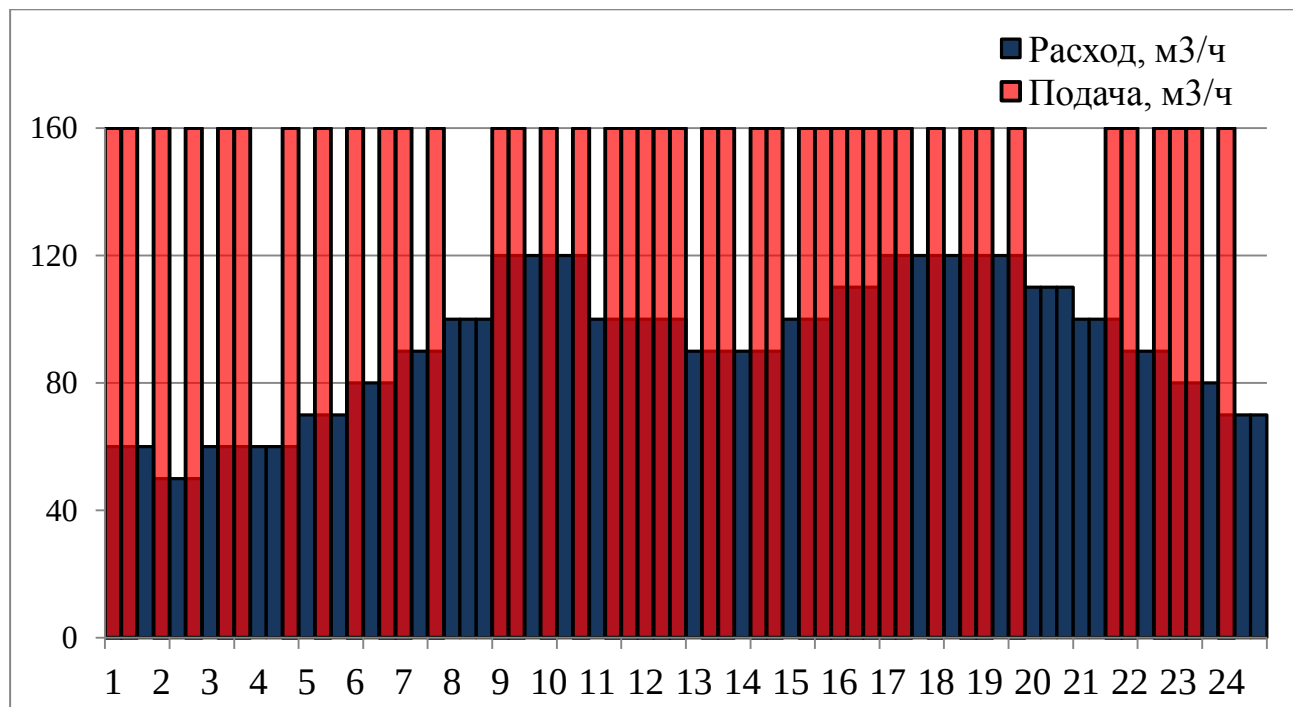


Рисунок 5.31 – Суточный график подачи расхода воды

Объем воды в резервуаре изменяется согласно зависимости, представленной на рисунке 5.32.

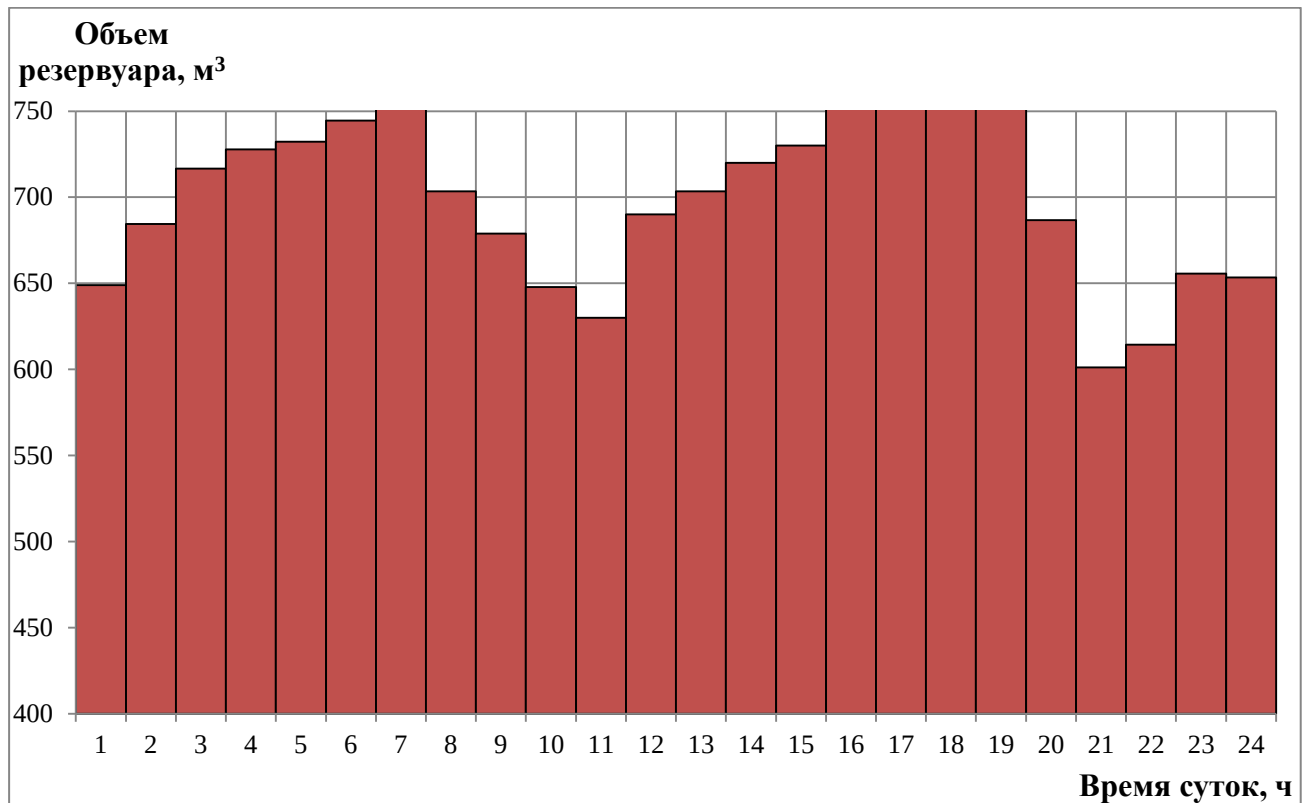


Рисунок 5.32 – Изменение объема аккумулирующего резервуара за сутки

В таблицу 5.8 сведены результаты исследований различных способов регулирования электрической нагрузки.

Наименьшие суточные затраты на приобретение ЭЭ получены при изменении частоты вращения насоса с использованием оптимизационной функции и прогноза потребления.

Таблица 5.8 – Затраты и потребление ЭЭ

| Способ регулирования                                                                              | Потребление ЭЭ за сутки, кВт*ч | Суточные затраты на ЭЭ, руб |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| Дросселирование                                                                                   | 691,15                         | 1838,8                      |
| Изменение частоты вращения насоса                                                                 | 406,37                         | 1180,7                      |
| Изменение частоты вращения насоса с использованием оптимизационной функции и прогноза потребления | 411,2                          | 870,58                      |
| Регулирование по закону повторно-кратковременного режима                                          | 505,31                         | 1160,8                      |

На основании проведенных исследований можно сделать выводы:

- При сравнении способов регулирования с изменением частоты вращения привода отметим (таблица 5.8), что прогнозная оптимизация режима работы НС 3-го подъема ведет к уменьшению затрат на ЭЭ, но в тоже время количество потребляемой энергии осталось на уровне классического частотного регулирования. Следовательно, отсутствует электроэффективность на уровне технологического процесса, однако на уровне производства результативность такой регулировки обеспечивает снижение суммарных затрат на приобретение ЭЭ на 26% за счет использования резервуара технической воды и внедрения методов прогнозирования потребления ЭЭ.
- Регулирование насоса по повторно-кратковременному закону 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.



## ГЛАВА 6. Оценка эффективности работы нагнетающего оборудования с использованием оптимизации и прогноза потребления электрической энергии

Эффективность использования методики прогноза и оптимизации потребления электрической энергии можно подтвердить и на примере нагнетающей установки. В качестве аккумулирующей емкости (по аналогии с резервуаром для насосной станции) для нагнетающей установки может выступать, к примеру, ресивер. Этапы методики предиктор-корректора (прогноза-оптимизации) аналогичны рассмотренной при анализе гидро- систем. Имея накопитель (ресивер), появляется возможность разорвать корреляцию графика нагрузки ЭЭ и уровня потребления нагнетающего вещества

На рисунке 6.1 приведена типовая структурная схема нагнетающей установки.

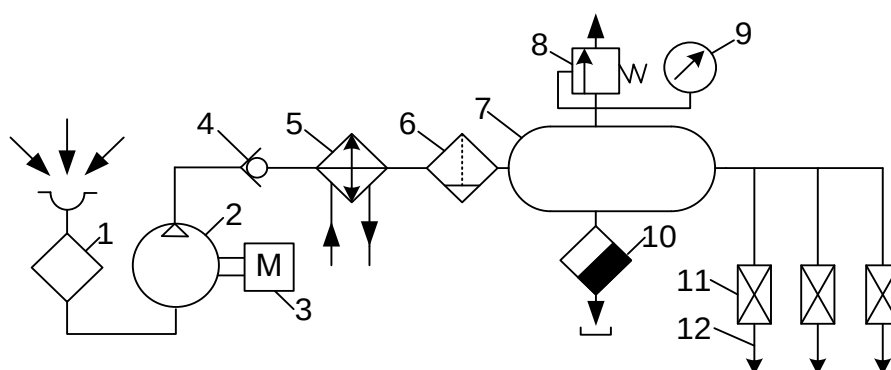


Рисунок 6.1– Структурная схема нагнетающей установки

Элемент 2 структурной схемы установки представляет собой нагнетающее устройство с приводным двигателем. Через заборный фильтр 1 нагнетающее устройство всасывает и нагнетает вещество в ресивер 7 через обратный клапан 4, охладитель 5 и фильтр - влагоотделитель 6. Водяной охладитель 5 охлаждает вещество и конденсирует до 70-80% содержащейся в веществе влаги.

Затем со 100-процентной относительной влажностью вещество поступает в ресивер 7. Ресивер предназначен для формирования запаса пневмоэнергии и

сглаживания пульсаций давления. В ресивере осуществляется охлаждение вещества и конденсация влаги, которая удаляется через вентиль 10.. Также ресивер снабжен функцией создания буферного запаса сжатого вещества для предотвращения падения давления сжатого вещества ниже минимально допустимого значения во время пиков потребления [80].

В оборудование ресивера входит предохранительный клапан 8 и манометр 9. Отвод вещества из ресивера осуществляется через краны 11 к пневмолиниям 12. Резкое падение давления исключается за счет использования обратного клапана 4 [80].

Для графика электрической нагрузки, представленного на рисунке 1.9, и учитывая, что в качестве приводного агрегата принят асинхронный электродвигатель АИР56В2 мощностью 0,55 кВт (рисунок 1.3) был подобран компрессор пневматический Matrix Standart 0,5 кВт, производительностью 48 л/мин с рабочим давлением 8 бар, представленный на рисунке 6.2 [81].



Рисунок 6.2– Компрессор Matrix Standart 0,5 кВт

По нижеприведенной формуле (6.1) определяется объем ресивера:

$$V_p = \frac{Q \cdot P_p \cdot t}{(P_{pmin} - P_p)} = \frac{2,88 \cdot 8 \cdot 8}{(8 - 8) \cdot 60} = 3,1 \text{ м}^3 \quad (6.1)$$

$V$

$P$  -необходимый объем ресивера, м<sup>3</sup>;

$Q$  - производительность компрессора, м<sup>3</sup>/час;

$t$  - время, необходимое для достижения рабочего давления, с;

$P_{pmin}$  - минимально допустимое рабочее давление, Бар;

$P_p$ - стандартное рабочее давление, Бар [82].

Принимаем объем ресивера 3,2 м<sup>3</sup>. При условии что рабочее и минимальное рабочее давление составляет 8 Бар.

В таблице 6.1 приведены значения потребления электрической энергии, а также соответствующая стоимость для низкого напряжения по каждому часу суток. Данные в таблице определены исходя из значений графика нагрузки (рисунок 1.9) и производительности нагнетающего устройства. Тариф на ЭЭ определен в соответствии с предельными уровнями цен на ЭЭ по данным ОАО «Томскэнергосбыт» за 15 декабря 2014 года [74].

Таблица 6.1 – Потребление и стоимость ЭЭ компрессорной установки

| Час   | Мощность, Вт | Давление, Па | Тариф на ЭЭ,<br>руб/кВтч | Стоимость<br>ЭЭ, руб |
|-------|--------------|--------------|--------------------------|----------------------|
| 01:00 | 200          | 142,31       | 1,46472                  | 0,284                |
| 02:00 | 200          | 142,31       | 1,47198                  | 0,294                |
| 03:00 | 224          | 171,35       | 1,4869                   | 0,333                |
| 04:00 | 224          | 171,35       | 1,50939                  | 0,338                |
| 05:00 | 248          | 198,31       | 1,49658                  | 0,371                |
| ..... |              |              |                          |                      |
| 24:00 | 200          | 142,31       | 1,51423                  | 0,303                |

За счет наполнения ресивера в часы минимума нагрузки, в данном случае это период времени с 00:00 по 07:00, с 10:00 по 14:00, и период с 17:00 по 23:00, происходит полное наполнение ресивера, в часы максимума нагрузки происходит расходование сжатого воздуха из ресивера [83].

При заданном графике нагрузки (рисунок 1.9.) пиковыми часами является период времени с 7:00 до 9:00 и с 14:00 по 16:00. Время 15:00 также является расчетным для определения стоимости пиковой мощности [83].

Для потребителя с максимально необходимым объемом потребляемого воздуха до 2,97 м<sup>3</sup>/час (49,5 л/мин) перераспределение нагрузки будет производиться согласно таблице 6.2. Данные таблицы приведены исходя из расчетов по минимизации целевой функции по формуле (5.31).

Таблица 6.2 – Потребление и стоимость ЭЭ при прогнозно-оптимизационном управлении

| Час   | Мощность при<br>прогнозно-<br>оптимизационном<br>управлении, Вт | Расход воздуха<br>при прогнозно-<br>оптимизационном<br>управлении, м <sup>3</sup> | Стоимость ЭЭ,<br>руб/кВт*ч | Стоимость<br>ЭЭ, руб |
|-------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|----------------------|
| 01:00 | 391,07                                                          | 2,05                                                                              | 1,46472                    | 0,58                 |
| 02:00 | 429,28                                                          | 2,28                                                                              | 1,47198                    | 0,64                 |
| 03:00 | 224,06                                                          | 1,17                                                                              | 1,4869                     | 0,34                 |
| 04:00 | 415,08                                                          | 2,17                                                                              | 1,50939                    | 0,62                 |
| 05:00 | 248,07                                                          | 1,30                                                                              | 1,49658                    | 0,41                 |
| 06:00 | 274,07                                                          | 1,43                                                                              | 1,67158                    | 0,49                 |
| 07:00 | 63,95                                                           | 0,33                                                                              | 1,79482                    | 0,12                 |
| 08:00 | 174,37                                                          | 0,91                                                                              | 1,84825                    | 0,32                 |
| 09:00 | 174,37                                                          | 0,91                                                                              | 1,83797                    | 0,31                 |
| 10:00 | 537,11                                                          | 2,81                                                                              | 1,80059                    | 0,96                 |
| 11:00 | 549,29                                                          | 2,88                                                                              | 1,7846                     | 0,99                 |
| 12:00 | 546,73                                                          | 2,86                                                                              | 1,79284                    | 0,98                 |
| 13:00 | 504,86                                                          | 2,64                                                                              | 1,79381                    | 0,92                 |
| 14:00 | 453,54                                                          | 2,37                                                                              | 1,82925                    | 0,84                 |
| 15:00 | 117,09                                                          | 0,61                                                                              | 1,86188                    | 0,215                |
| 16:00 | 317,50                                                          | 1,66                                                                              | 1,83848                    | 0,58                 |
| 17:00 | 346,00                                                          | 1,81                                                                              | 1,82886                    | 0,62                 |
| 18:00 | 308,00                                                          | 1,61                                                                              | 1,78926                    | 0,54                 |
| 19:00 | 308,00                                                          | 1,61                                                                              | 1,74506                    | 0,52                 |
| 20:00 | 274,00                                                          | 1,44                                                                              | 1,69495                    | 0,46                 |
| 21:00 | 274,00                                                          | 1,43                                                                              | 1,68123                    | 0,45                 |
| 22:00 | 248,00                                                          | 1,30                                                                              | 1,62503                    | 0,39                 |
| 23:00 | 224,00                                                          | 1,17                                                                              | 1,57197                    | 0,34                 |
| 24:00 | 200,00                                                          | 1,05                                                                              | 1,51423                    | 0,29                 |

Используя составляющие формулы (5.31) за счет использования аппарата регулирования и прогнозирования получаем экономию в сутки около 0,5 рублей в сутки, а также в пиковый час происходит экономия ЭЭ в размере 381,9 Вт\*ч и соответственно при ставке за мощность покупки 415 612,9 руб/МВт [74] экономия в денежном эквиваленте составила 158 рублей. При тарифе за сетевую мощность 986 741 руб/МВт экономия составила 375,9 рублей. Суммарная экономия в месяц будет достигать 548,9 рублей.

Графики электрической нагрузки при частотном регулировании и регулировании с использованием прогнозно-оптимизационного управления представлены на рисунке 6.3.

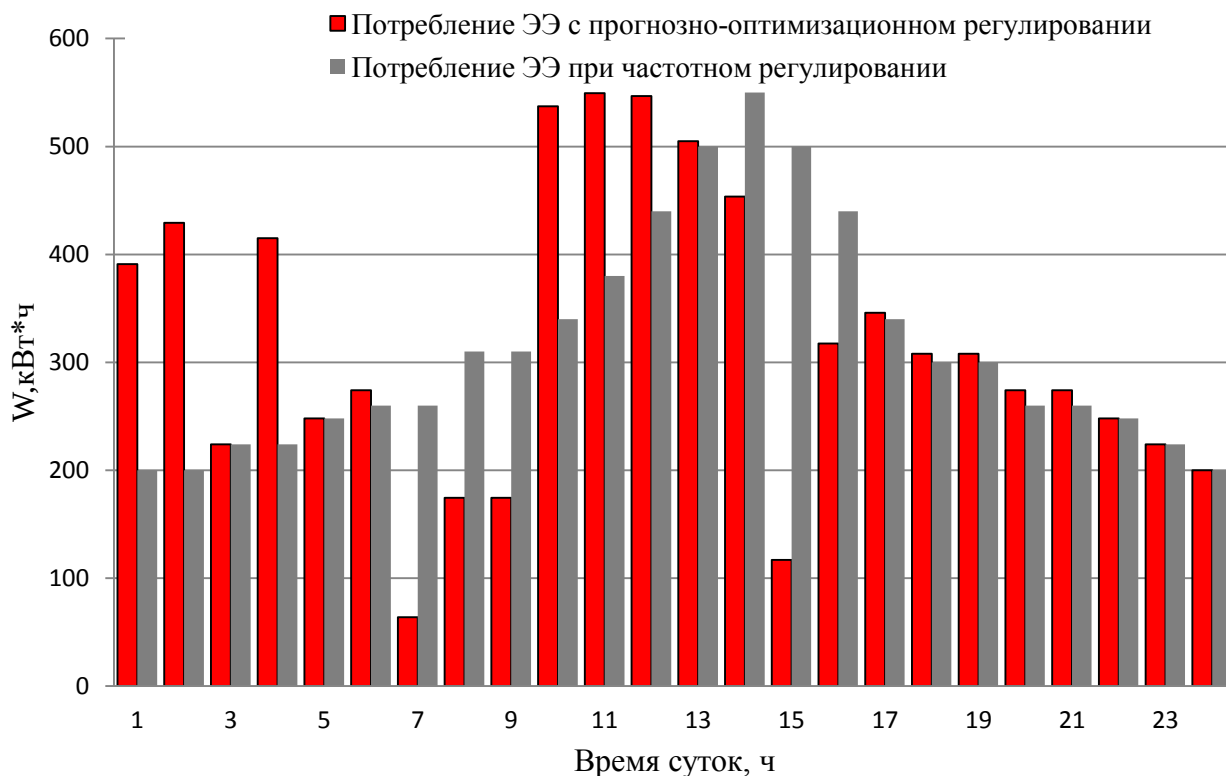


Рисунок 6.3 – Графики электрической нагрузки при частотном регулировании и регулировании с использованием прогнозно-оптимизационного управления

Реализованная структура системы управления работой нагнетающей установки представлена на рисунке 6.4. По структуре она полностью аналогична системе управления насосной станцией, различно только программное наполнение, учитывающее действительные условия работы нагнетающей установки

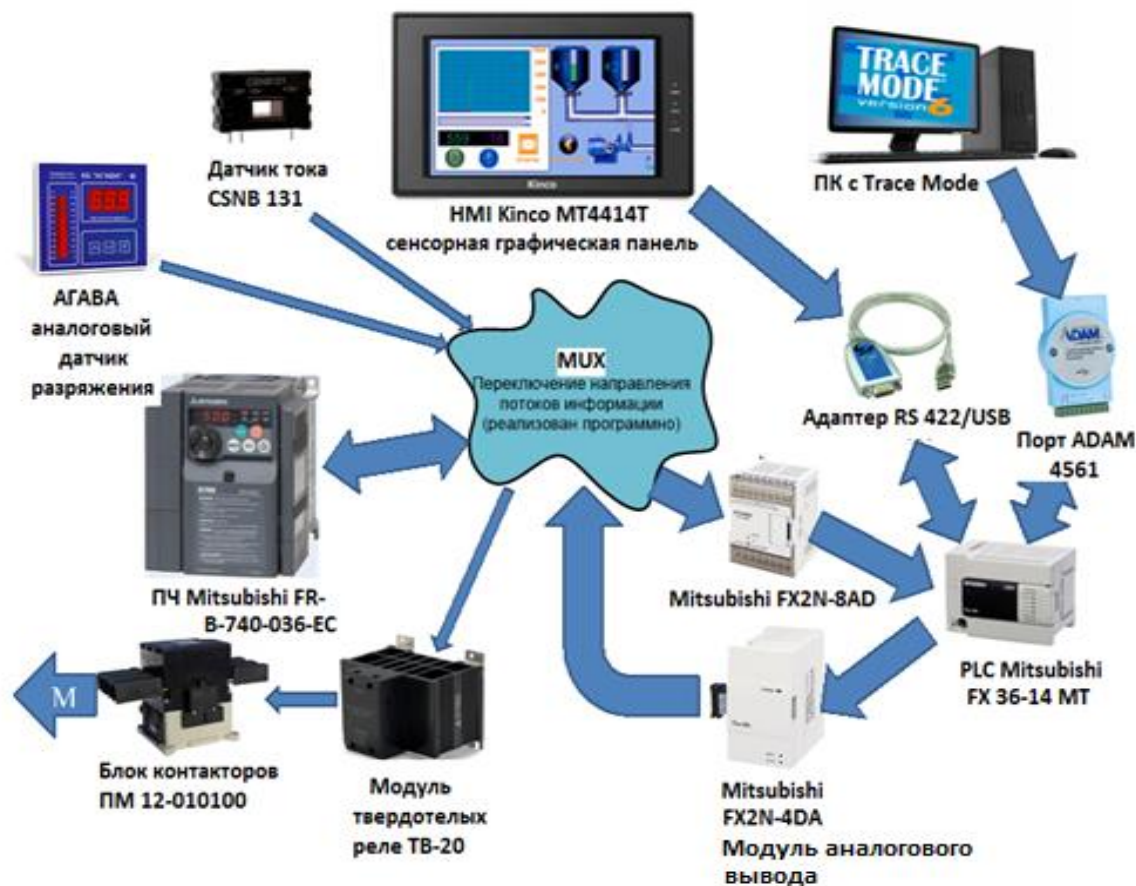


Рисунок 6.4 – Структура управления компрессорной станцией

На рисунке 6.5. приведены экспериментально полученные характеристики, соответствующие расчетным данным с точностью до 2%.

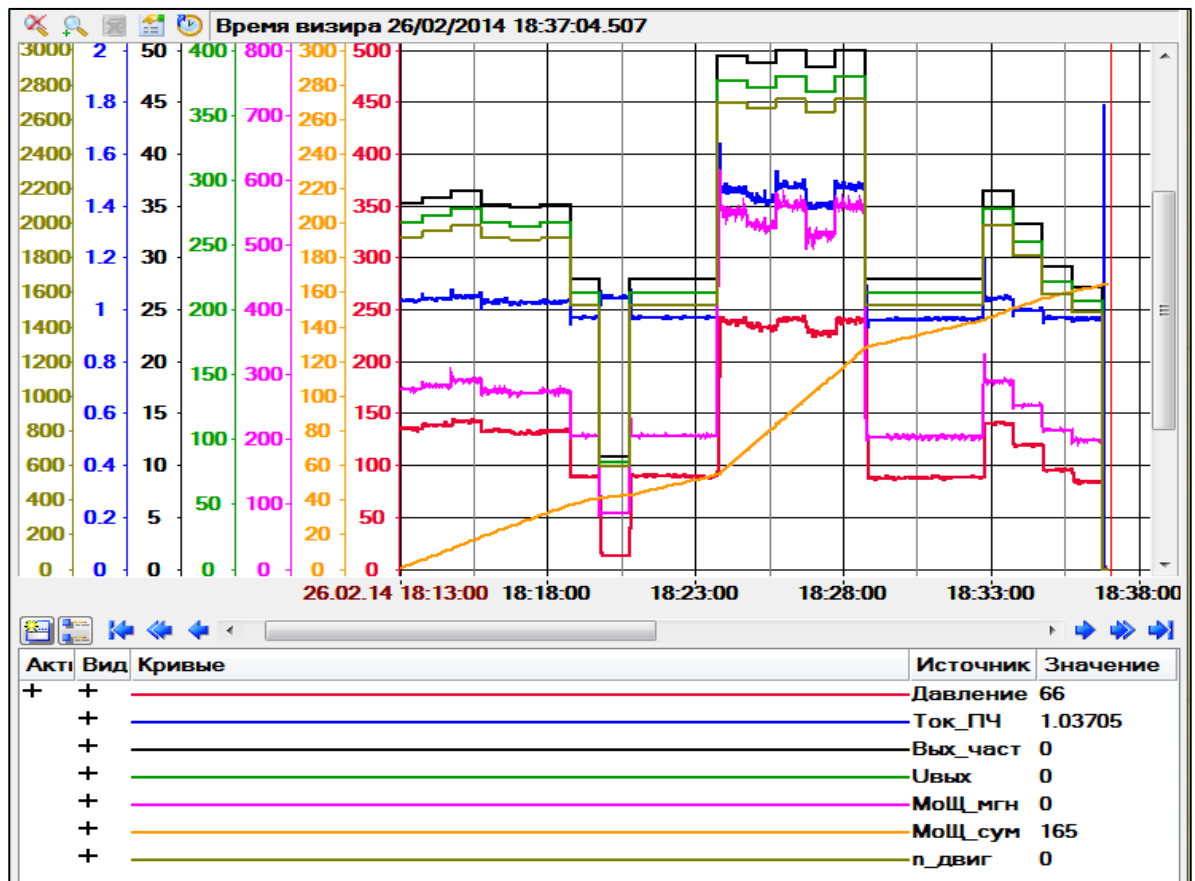


Рисунок 6.5 – Экспериментальные характеристики

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.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе было рассмотрено применение прогнозно-оптимизационного аппарата с целью минимизации затрат на ЭЭ, в условиях регулирования режима работы насосного агрегата технической воды.

Для проведения исследований использовались данные реальной системы технического водоснабжения от водозаборной станции до пиково-резервной котельной, и параметры насосной станцией 3-го подъема.

Анализ тарифов для 6 ЦК розничного рынка ЭЭ, к которой относится НС 3-го подъема, и анализ графика нагрузки данной станции показал, что часы максимальной стоимости ЭЭ и часы пиковой нагрузки (отчётный час, диапазон часов пик) совпадают с максимумами графика нагрузки насосной станции. Данная особенность ведет к увеличению затрат на ЭЭ.

В целях имитации технологического процесса сформирована модель насосной станции (электрическая и гидравлическая части), система трубопроводов и водопотребления. Расчетная модель позволяет качественно и количественно оценить потребление ЭЭ, расход и подачу воды, давление в системах трубопровода и др. необходимых параметров. Достоверность модели оценена по осциллограммам пуска и работы приводного механизма, графиками зависимостей насосного оборудования и системы трубопроводов. Критерием оценки является сопоставимость расчетных параметров с каталожными параметрами работы электрооборудования и данными оборудования ООО «Томскводоканал».

На основании имитационной модели построены характеристики насосной станции при таких основных способах регулирования как: дросселирование, изменение частоты вращения насосного агрегата, частотное регулирование с прогнозной оптимизацией и повторно-кратковременный режим работы АД. Выполнен расчёт суммарных затраты на приобретение ЭЭ и мощности для каждого из данных способов регулирования. Было доказано, что прогнозная



оптимизация режима работы насосной станции 3-го подъема ведет к уменьшению затрат на электроэнергию на 26 %.

По результатам исследования можно сделать вывод о том, что:

- Произведена оценка ситуации розничном рынке ЭЭ и мощности. На данном этапе развития розничного рынка наблюдается повышение стоимости платы за отклонения и при этом также наблюдается очевидный рост стоимости за сетевую мощность и мощность покупки. И прогноз в данном случае выступает не просто как элемент планирования потребления ЭЭ для передачи данных гарантирующему поставщику, но и как важный фактор управления технологическим процессом. Для объектов водоснабжения ситуация на рынках ЭЭ влияет на стоимость потреблённой ЭЭ и мощности и обязывает технологические объекты мощностью выше 670 кВт контролировать уровень своего электропотребления. Для потребителей, рассчитывающихся с энергосбытовыми компаниями по 5,6 ЦК, возникает проблема прогнозирования ЭЭ. С этой целью на примере данных НС 3-го подъема произведен анализ однофакторных методов прогнозирования ЭЭ. Наиболее точным, применительно к данным графика нагрузки НС 3-го подъема, является метод нейронных сетей и метод АРПСС с разложением по вейвлет-базису.
- Разработан алгоритм прогнозно-оптимизационного управления работой насосного агрегата технической воды НС 3-го подъема. Разработана имитационная модель в программной среде *MATLAB Simulink* для фрагмента технического водоснабжения НС 3-го подъема с целью дальнейшего анализа различных способов регулирования насосного агрегата. В качестве основных объектов для имитационной модели выступает насосная установка технического водоснабжения *Grundfos NB 80-200/211* мощностью 45 кВт с приводом двигателя *MJ225-2-55F*.

- На базе указанной имитационной модели проведены исследования таких способов регулирования насосных агрегатов, как дросселирование, регулирование числа оборотов вала насосного агрегата, регулирование числа оборотов насосного агрегата с использованием оптимизации и прогнозирования ЭЭ, а также повторно-кратковременный режим работы. Исходя из полученных результатов, прогнозная оптимизация режима работы НС 3-го подъема ведет к уменьшению затрат на ЭЭ, но в тоже время количество потребляемой энергии осталось на уровне классического частотного регулирования. Следовательно, отсутствует электроэффективность на уровне технологического процесса, однако учет планово-экономических отношений, порядка расчета за ЭЭ с гарантирующим поставщиком, дает производству возможность снизить затраты на покупку ЭЭ до 26% даже при росте электропотребления в связи с использованием использования резервуара технической воды.
- На основании проведенного эксперимента прогнозно-оптимизационного регулирования была доказана тождественность полученных характеристик на базе имитационных моделей и при проведении экспериментальных исследований.

Таким образом, в результате решения поставленных задач была достигнута цель исследований данной работы - разработана методика прогнозно-оптимизационного управления работы электрооборудования тракта технического водоснабжения с учетом межуровневых связей автоматизации. Прогнозно-оптимизирующее управление в сочетании с традиционными подчиненными системами регулирования имеет корреляционную связь между графиками нагрузки ПРК и НС 3-го подъема и устанавливает новый порядок отношений между изменением тарифной ставки и режимом работы насосного агрегата. Достигается цель – минимизация оплаты за ЭЭ при сохранении графика потребления технической воды ПРК.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 13.11.2009 №1719 р. «Об утверждении энергетической стратегии России на период до 2030 года» [Электронный ресурс]. — Сайт Министерства Энергетики Российской Федерации. — Режим доступа: <http://minenergo.gov.ru/node/1026>.
2. Федеральный закон от 23.11.2009 № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» [Электронный ресурс]. — Официальный сайт компании «КонсультантПлюс». — Режим доступа: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_170601/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_170601/).
3. Кожухова, А.В. Моделирование и исследование САУ насосной станции/ А.В. Кожухова, К.Н. Рамазанов, И.Е. Савельев // Символ науки. —2016. —№ 3. — С.48-53.
4. Лезнов, Б.С. Частотно- регулируемый привод насосных установок / Б.С.Лезнов. — Москва: Энергоатомиздат, 2006. — 360 с.
5. Афанасьев, А.В. Применение ЧРП для повышения энергоэффективности насосной установки / А.В. Афанасьев, Л.М. Беккер, И.Б Твердохлебов// Сайт «НТЦ Энерго-Ресурс». — Режим доступа: <http://en-res.ru/wp-content/uploads/2012/12/statya-15.pdf> .
6. Петров, Д. Регулируемый электропривод в насосных установках/ Д.Петров //Силовая электроника. — 2005. — № 4. — С.18-22.
7. Сыромятников, И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей/ И.А.Сыромятников. — Москва: Энергоатомиздат, 1984. — 240 с.
8. Воздвиженский, В.Б. Частотный - регулируемый привод. К вопросу установки на электродвигателях насосов холодного водоснабжения ЦТП / В.Б. Воздвиженский, Н.И.Кошелев //Энергосбережение.—2005.—№7.— С.66-70.
9. Лазарев, Г.Б. Частотно-регулируемый электропривод насосных и вентиляторных установок / Г.Б. Лазарев// Силовая электроника.—2007.—№3.— С.41-48.

10. Онищенко, Г.Б. Автоматизированный электропривод промышленных установок/ Г.Б.Онищенко. — М.: РАСХН — 2001. — 520 с.
11. Соколовский, Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учебник для вузов по специальности 140604 "Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов" направления 140600 "Электротехника, электромеханика и электротехнологии"/ Г.Г. Соколовский.— М.: «Академия». — 2006. — 272 с.
12. Siskind, Charles S. Electrical Control Systems in Industry. — New York: McGraw-Hill. — 1963. — 508 p.
13. Bose, Bimal K .Power Electronics and Motor Drives: Advances and Trends. — Amsterdam: Academic. — 2006. — 917 p.
14. Novak, Peter. The Basics of Variable-Frequency Drives [Электронный доступ]. — 2009. — Режим доступа: <https://ru.scribd.com/doc/305987447/VFD-Manual>.
15. Ексаев, А.Р. Вопросы оптимизации режимов работы системы водоснабжения [Электронный доступ]. — Сайт ИГС «City Com». —Министерства Энергетики Российской Федерации. — Режим доступа: <http://www.citycom.ru/publications/apr-2001.php>.
16. Бабинович, Д.Е. Уровни оптимизации режима работы оборудования насосной станции/ Д.Е.Бабинович, Е.А.Шутов// Промышленный АСУ и контроллеры. — 2014. — №1. — С 10-14.
17. Герасимов, М. Оптимизация управления и структуры систем вентиляции [Электронный ресурс].— Мир климата.—2008.— №51. — Режим доступа: [http://mir-klimata.info/archive/number51/article/16\\_optimiz/](http://mir-klimata.info/archive/number51/article/16_optimiz/).
18. Электродвигатель АИР 56 В2 0,25/3000 кВт/об. Каталог оборудования сайта Пульс цен [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [http://ekb.pulscen.ru/products/elektrodvigatel\\_air\\_56\\_v2\\_0\\_25\\_3000\\_kvt\\_ob\\_min\\_air56v2\\_0\\_25kvt\\_3000ob\\_min\\_14911310](http://ekb.pulscen.ru/products/elektrodvigatel_air_56_v2_0_25_3000_kvt_ob_min_air56v2_0_25kvt_3000ob_min_14911310).

19. Вентилятор ВЦ 4 – 75. Каталог оборудования сайта Лаком [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://lakomvent.ru/ventillyator-vc-4-75.html>.

20. Вентилятор центробежный ВЦ 4-75 (низкого давления). Промышленные вентиляторы, калориферы КСк , КПСк и климатическое оборудование [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [http://www.ventstroy.ru/products/fans\\_radial\\_detail.php?ID=47](http://www.ventstroy.ru/products/fans_radial_detail.php?ID=47).

21. Контроллер PLC FX3G Mitsubishi Electric компактный программируемый. Каталог оборудования ООО «Глобал-А» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [http://www.global-a.pulscen.ru/goods/10985325-kompaktnyye\\_programmiruyemye\\_kontrollery\\_plc\\_fx3g\\_mitsubishi\\_electric/](http://www.global-a.pulscen.ru/goods/10985325-kompaktnyye_programmiruyemye_kontrollery_plc_fx3g_mitsubishi_electric/).

22. Преимущества частотного регулирования электродвигателя. Сайт ООО «Эстудо» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [www.частотники.рф](http://www.частотники.рф).

23. Постановление правительства РФ от 04.05.2011 №442 (ред. от 11.08.2014) «О функционировании розничных рынков электрической энергии, полном и (или) частичном ограничении режима потребления электрической энергии» [Электронный ресурс]. — Официальный сайт компании «КонсультантПлюс». — Режим доступа: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_130498/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_130498/).

24. 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.

25. Макоклюев, Б.И. Методы и средства анализа и планирования электропотребления энергообъединений и энергосистем: автореф. дис. на соискание степени докт.техн.наук: 05.14.02/ Макоклюев Борис Иванович. — Москва, 2005. — 22 с.

26. 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.

27. Кудрин, Б.И. Научно-технический прогресс и формирование техноценозов/ Б.И.Кудрин // ЭКО: Экономика и организация промышленного производства. — 1980.—№8.— С.15-28.

28. Гнатюк, В.И. Моделирование процесса электропотребления объектов техноценоза/ В.И.Гнатюк // Электрика. — 2004. — №4. — С. 36-41.

29. Бажинов, А.Н. Метод прогнозирования объемов потребления электроэнергии предприятием черной металлургии на основе нейро-нечетких алгоритмов: автореф. дис. на соискание степени канд. техн. наук: 05.13.01/ Бажинов Алексей Николаевич. — Череповец, 2011. — 23 с.

30. Грицай, А. Краткосрочное прогнозирование потребления электроэнергии с использованием нейронной сети [Электронный ресурс] / А.Грицай, А.Гаак// ЭнергоРынок. —2007.—№11.—Режим доступа: <http://www.e-m.ru/er/2007-11/23347/>.

31. Пахомов, А.В. Методика прогнозирования помесячного расхода электрической энергии потребителей региона для мониторинга и принятия стратегических решений по электропотреблению : автореф. дис. на соискание степени канд. техн. наук: 05.09.03/ Пахомов Андрей Викторович. — Москва, 2009. —18 с.

32. Соломкин, А.В. Краткосрочное прогнозирование потребления электроэнергии с помощью нейросетевых методов [Электронный ресурс]/ А.В.Соломкин // Электроника и информационные технологии. — Режим доступа: [http://fetmag.mrsu.ru/2011-1/pdf/Short-Term\\_Forecasting.pdf](http://fetmag.mrsu.ru/2011-1/pdf/Short-Term_Forecasting.pdf).

33. Nagasaka K., Al Mamun. M. Long-term peak demand prediction of 9 Japanese power utilities using radial basis function networks// IEEE Power Eng. Society General Meeting. — 2004. — Vol.1.—P. 315-322.

34. Hobbs N. J., Kim B. H., Lee K. Y. Long-term load forecasting using system type neural network architecture// IEEE Intelligent Sys. Applications to Power Systems. — 2007.— P.1–7.

35. Mao H., Zeng X., Leng G., Zhai Y., Keane J. A. Short-term and midterm load forecasting using a bilevel optimization model// IEEE Trans. On PowerSyst. —

2009.—Vol.24.—P.1080-1090.

36. Бенн, Д.В. Сравнительные модели прогнозирования электрической нагрузки / Д.В. Бенн, Е.Д. Фармер. — М.: Энергоатомиздат. — 1987. — 200 с.

37. Добеши, И. Десять лекций по вейвлетам / И.Добеши. — М.: РХД, 2001. — 464 с.

38. 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.

39. 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 Графикас, 2012. — С. 52-55.

40. Yao,S.J. Wavelet transform and neural networks for short-term electrical load forecasting/ S.J. Yao, Y.H. Song, L.Z. Zhang, X.Y. Cheng // Energy Conv Manage. — 2000. — № 41. —P.1975-1988.

41. Mallat, S. A theory for multiresolutional signal decomposition: the wavelet representation/ S. A. Mallat // IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence. —1989. — №7. — P.674-693.

42. Воробьев, В.И. Теория и практика вейвлет-преобразования / В.И.Воробьев, В.Г.Грибунин. — ВУС, 1999. —204 с.

43. Приложения вейвлет-анализа [Электронный ресурс].—Base Group Labs.Технологии анализа данных. — Режим доступа: [http://www.basegroup.ru/library/cleaning/wavelet\\_applications/](http://www.basegroup.ru/library/cleaning/wavelet_applications/).

44. Давыдов, А.В. Вейвлетные преобразования сигналов. Тема 7: Вейвлетная очистка от шумов и сжатие сигналов [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://uran.donetsk.ua/~masters/2012/fkita/lavrov/library/davidov.pdf>.

45. Кремер, Н.Ш. Эконометрика: учебник для вузов/ Н.Ш. Кремер, Б.А. Путко; под. ред. проф. Н.Ш. Кремера. — М.: ЮНИТИ – ДАНА, 2002. —311 с.

46. Халафян, А.А. STATISTICA 6. Статистический анализ данных / А.А.Халафян. — М.: Бином-Пресс— 2010. —512 с.

47. 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.

48. 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.

49. 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.

48. Дьяконов, В. MATLAB. Обработка сигналов изображений. Специальный справочник./ В. Дьяконов. — СПб.: Питер, 2002. — 608 с.

49. Грибунин, В.Г.. Введение в вейвлет-преобразование [Электронный ресурс].— Режим доступа: [http://techlibrary.ru/b/2k1r1j1b1u1o1j1o\\_2j.2k\\_2j1c1f1e1f1o1j1f\\_1c\\_1c1f1k1c1m1f1t-1q1r1f1p1b1r1a1i1p1c1a1o1j1f.pdf](http://techlibrary.ru/b/2k1r1j1b1u1o1j1o_2j.2k_2j1c1f1e1f1o1j1f_1c_1c1f1k1c1m1f1t-1q1r1f1p1b1r1a1i1p1c1a1o1j1f.pdf).

50. Давыдов, А.В. Цифровая обработка сигналов: Тематические лекции/ А.В. Давыдов. — Екатеринбург: УГГУ, 2007. —185 с.

51. Карпунова, С.Ю. Преимущества модели ARIMA для краткосрочного прогнозирования поведения ценовых графиков Forex[Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://masters.donntu.org/2007/fvti/karpunova/library/konferenciya.htm>

52. Yule G.Phil. Trans.Roysoc.London A. —1927. —V.226. — P.267-298.

53. Walker G.Proc.Roy.soc.London A. —1931. — V.131. — P.518-532.



54. Тихонов, Э.Е. Методы прогнозирования в условиях рынка: Учебное пособие./Э.Е.Тихонов.— Невинномыск, 2006. — 221 с.

55. Материалы по GARCH- моделям [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [www.digital-it.ru/article/ARCH%20model.doc](http://www.digital-it.ru/article/ARCH%20model.doc).

56. 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.

57. 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.

58. 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.

59. 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.

60. Шабельников, А.Н. Нейросетевые и нечетно-логические модели временных процессов/ А.Н.Шабельников, В.А.Шабельников// Известия Южного федерального университета. Технический науки. —2007. —№2.—Т. 77.— С.170-174.

61. Леоненков, А. Нечеткое моделирование в среде Matlab и FuzzyTech./ А.Леоненков. — Санкт- Петербург: «БХВ-Петербург», 2005.— 725 с.

62. 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.

63. 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.

64. Чернышев, А.Ю. Расчет характеристик электроприводов переменного тока. Ч.1. Асинхронный двигатель: Учебное пособие /А.Ю. Чернышев, И.А. Чернышев. — Томск: Изд-во ТПУ, 2005. —136 с.

65. Механические характеристики электродвигателей и производственных механизмов [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://electricalschool.info/spravochnik/maschiny/571-mekhanicheskie-kharakteristiki.html>.

66. Электромеханические свойства двигателей переменного тока [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [http://epla.susu.ac.ru/glv\\_030.htm](http://epla.susu.ac.ru/glv_030.htm).

67. Мощинский, А. Ю. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным/ А. Ю Мощинский, В. Я Беспалов, А. А. Кирякин А. А.// Электричество. —1998. —№ 4. — С. 38-42.

68 Фащиленко, В.Н. Регулируемый электропривод насосных и вентиляторных установок горных предприятий./В.Н.Фащиленко — М.: Горная книга, 2011. — 264 с.

69 Yamamura, S. Transient phenomena and control of AC servomotor-proposal of field acceleration method/ S. Yamamura, S. Nakagawa. — IEE of Japan, 1981. —P. 557-563.

70. Busca, Cristian. Open loop low speed control for PMSM in high dynamic application. — Aalborg, Denmark.: Aalborg universitet, 2010.

71. Altivar 212. Преобразователь частоты для систем HVAC (вентиляторы и насосы) на мощности от 0,75 до 75 кВт [Электронный ресурс].— Режим доступа: <http://www.schneider-electric.com/products/ruru/2900-privodnaa-tehnika/2945-specializirovannye-pc/60162-altivar-212/>.

72. Преобразователь частоты серии Altivar 212 мощность 45 кВт. Сайт Elecsun. Электротехническое оборудование [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://eleksun.com.ua/preobrazovatel-chastoty-serii-altivar-212-moshchnost-45-kvt-3f-380v-schneider-electric.html>.

73. Насос GrundfosNB80-160/177. Сайт компании Абиана. [Электронный ресурс].— Режим доступа: <http://www.abiana.ru/g/grundfos/160604/>.

74. Фактические предельные уровни цен. Сайт ОАО «Томскэнергосбыт» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [http://www.ensb.tomsk.ru/corporate\\_banking/rates\\_and\\_prices/](http://www.ensb.tomsk.ru/corporate_banking/rates_and_prices/).

75. Канторович, С.А. Прогнозирование потребления электроэнергии./ С.А.Канторович [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.basegroup.ru/solutions/case/electra/>.

76. 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 21<sup>st</sup> Century: The Quest for Sustainable Energy (Energy Quest 2014). — Ekaterinburg, 2014. — Vol.2. — P.501-511.

77. Литвиненко, К.В. Решение задачи оптимизации на основе метода приведенного градиента и принципа симметрии./ К.В.Литвиненко [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [file:///C:/Documents%20and%20Settings/Raml/%D0%9C%D0%BE%D0%B8%20%D0%B4%D0%BE%D0%BA%D1%83%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D1%82%D1%8B/Downloads/Nvngu\\_2012\\_6\\_24.pdf](file:///C:/Documents%20and%20Settings/Raml/%D0%9C%D0%BE%D0%B8%20%D0%B4%D0%BE%D0%BA%D1%83%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D1%82%D1%8B/Downloads/Nvngu_2012_6_24.pdf).

78. 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.

79. 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.

80. Пневматический привод. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://gidravl.narod.ru/pnevpriv.html>.

81. Российская строительная сеть. Компрессор пневматический MATRIX STANDARD 0,5КВт, 48л/мин, 5л. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.stroy.net.ru/catalog/kompressor-pnevmaticheskij-matrix-standard-0-5kvt-48l-min-5l-5388745.html>.

82. Пневмо Техника. Подбор ресивера. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://pnevmo.com.ru/articles/5.htm>.

83. Плановые часы пиковой нагрузки . Сайт ПАО «Томскэнергосбыт» [Электронный ресурс].— Режим доступа: [http://www.ensb.tomsk.ru/corporate\\_banking/rates\\_and\\_prices/?sid=19&year=&month=#results](http://www.ensb.tomsk.ru/corporate_banking/rates_and_prices/?sid=19&year=&month=#results).

## Приложение 1. Предельные уровни цен на электроэнергию и мощность

Таблица 1 – Данный предельных уровней цен за июнь 2013 года ОАО «Томскэнергосбыт»

| Дата | Ставка для фактических почасовых объемов покупки электрической энергии, отпущенных на уровне напряжения СН I<br>(рублей/МВт·ч без НДС) |           |           |           |           |           |           |           |           |            |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |            |
|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|
|      | 0:00-1:00                                                                                                                              | 1:00-2:00 | 2:00-3:00 | 3:00-4:00 | 4:00-5:00 | 5:00-6:00 | 6:00-7:00 | 7:00-8:00 | 8:00-9:00 | 9:00-10:00 | 10:00-11:00 | 11:00-12:00 | 12:00-13:00 | 13:00-14:00 | 14:00-15:00 | 15:00-16:00 | 16:00-17:00 | 17:00-18:00 | 18:00-19:00 | 19:00-20:00 | 20:00-21:00 | 21:00-22:00 | 22:00-23:00 | 23:00-0:00 |
| 1    | 1081,65                                                                                                                                | 1042,56   | 1036,3    | 1029,91   | 1024,2    | 1012,97   | 1042      | 1062,82   | 1088,01   | 1101,98    | 1096,64     | 1096,67     | 1111,16     | 1115,37     | 1115,72     | 1108,07     | 1104,57     | 1084,78     | 1080,87     | 1098,65     | 1097,88     | 1096,91     | 1090,57     | 1076,85    |
| 2    | 1106,69                                                                                                                                | 1086,44   | 1070,36   | 1059,07   | 1033,83   | 1026,48   | 1051,38   | 1066,04   | 1088,78   | 1095,64    | 1100,41     | 1079,14     | 1098,92     | 1102,88     | 1102,68     | 1100,25     | 1109,65     | 1112,31     | 1105,98     | 1109,61     | 1107,75     | 1102,44     | 1087,44     | 1082,33    |
| 3    | 1073,2                                                                                                                                 | 1063,85   | 1055,7    | 1018,84   | 1026,77   | 1090,47   | 1099,35   | 1117,63   | 1139,97   | 1164,45    | 1148,33     | 1137,6      | 1132,14     | 1135,93     | 1135,5      | 1129,81     | 1128,89     | 1126,13     | 1107,68     | 1124,2      | 1104,48     | 1098,16     | 1085,02     | 1045,8     |
| 4    | 1015,44                                                                                                                                | 1015,52   | 1011,36   | 993,19    | 990,76    | 1052,13   | 1061,87   | 1082,89   | 1112,67   | 1119,63    | 1113,01     | 1111,17     | 1109,74     | 1115,75     | 1113,71     | 1083,65     | 1100,1      | 1095,7      | 1093,45     | 1086,39     | 1076,25     | 1024,34     | 1048,8      | 1036,52    |
| 5    | 1018,99                                                                                                                                | 989,73    | 981,63    | 950,47    | 954,93    | 1019,55   | 1136,82   | 1165,45   | 1172,69   | 1169,2     | 1159,31     | 1139,37     | 1137,4      | 1155,36     | 1159,79     | 1144,96     | 1152,67     | 1124,49     | 1127,49     | 1067,74     | 1046,74     | 1021,42     | 1030,68     | 1006,66    |
| 6    | 1082,01                                                                                                                                | 1052,35   | 981,48    | 953,38    | 961,5     | 1028,49   | 1092,63   | 1109,61   | 1122,51   | 1128,06    | 1129,06     | 1125,34     | 1121,51     | 1124,5      | 1123,1      | 1121        | 1119,42     | 1108,52     | 1119,14     | 1128,06     | 1116,57     | 1105,14     | 1096,8      | 1067,76    |
| 7    | 1080,07                                                                                                                                | 1058,75   | 1034,98   | 999,7     | 997,56    | 1053,2    | 1095,18   | 1109,62   | 1126,62   | 1148,73    | 1146,96     | 1140,89     | 1126,16     | 1126,68     | 1127,25     | 1128,45     | 1127,68     | 1122,47     | 1131,53     | 1136,66     | 1127,96     | 1118,11     | 1122,57     | 1086,71    |
| 8    | 1117,39                                                                                                                                | 1107,57   | 1060,56   | 1031,14   | 1022,4    | 1064,46   | 1085,88   | 1100,17   | 1132,38   | 1144,04    | 1176,67     | 1168,69     | 1139,42     | 1141,33     | 1142,49     | 1155,49     | 1134,84     | 1129,36     | 1133,96     | 1172,04     | 1176,29     | 1171,51     | 1135,65     | 1116,71    |
| 9    | 1080,14                                                                                                                                | 1053,09   | 1028,48   | 1017,69   | 998,99    | 1004,34   | 1037,8    | 1069,9    | 1086,83   | 1105,24    | 1125,88     | 1117,96     | 1118,48     | 1118,68     | 1119,92     | 1125,96     | 1127,65     | 1110,45     | 1125,89     | 1125,41     | 1125,3      | 1125,7      | 1128,32     | 1100,59    |
| 10   | 1062,62                                                                                                                                | 1049,7    | 1027,4    | 1016,41   | 1029,19   | 1100,55   | 1102,75   | 1123,69   | 1133,02   | 1139,54    | 1153,36     | 1151,97     | 1144,6      | 1147,65     | 1144,41     | 1138,05     | 1135,08     | 1131,32     | 1124,75     | 1123,83     | 1122,78     | 1121,4      | 1120,64     | 1107,26    |
| 11   | 1069,82                                                                                                                                | 1046,97   | 1028,88   | 1015,59   | 1058,23   | 1085,24   | 1110,09   | 1136,13   | 1151,18   | 1146,41    | 1151,09     | 1162,84     | 1158,05     | 1168,04     | 1173,65     | 1159,35     | 1150,66     | 1131,4      | 1126,83     | 1143,57     | 1153,3      | 1140,84     | 1146,02     | 1102,71    |
| 12   | 1037,12                                                                                                                                | 1011,76   | 991,99    | 954,82    | 954,22    | 991,47    | 1001,9    | 1029,79   | 1054,3    | 1065,69    | 1080,45     | 1084,89     | 1081,5      | 1086,9      | 1091,22     | 1094,17     | 1092,57     | 1069,13     | 1080,1      | 1092,91     | 1113,01     | 1103,38     | 1102,95     | 1056,58    |
| 13   | 967,59                                                                                                                                 | 951,3     | 933,45    | 910,93    | 964,69    | 994,32    | 1012,78   | 1028,98   | 1046,03   | 1075,63    | 1080,51     | 1055,97     | 1048,84     | 1050,68     | 1057,1      | 1051,85     | 1046,71     | 1037,02     | 1042,35     | 1041,19     | 1041,12     | 1035,13     | 1019,7      | 986,09     |
| 14   | 964,37                                                                                                                                 | 957,76    | 942,21    | 964,47    | 955,97    | 997,16    | 1018,36   | 1030,32   | 1053,44   | 1040,62    | 1065,02     | 1049,27     | 1046,14     | 1060,97     | 1058,55     | 1054,46     | 1044,02     | 1024,72     | 1028,14     | 1033,85     | 1040,27     | 1028,52     | 1025,49     | 1002,09    |
| 15   | 1072,58                                                                                                                                | 1064,6    | 1037,52   | 1048,09   | 1060,5    | 1069,49   | 1085,94   | 1106,09   | 1135,69   | 1154,59    | 1151,08     | 1157,48     | 1157,69     | 1154,71     | 1158,01     | 1160,66     | 1157,03     | 1148,73     | 1153,94     | 1155,06     | 1150,23     | 1156,06     | 1137,99     | 1095,26    |
| 16   | 1073,44                                                                                                                                | 1061,42   | 1038,01   | 1027,57   | 1041,9    | 1064,31   | 1079,3    | 1092,35   | 1110,19   | 1122,7     | 1127,97     | 1137,5      | 1143,9      | 1148,42     | 1147,42     | 1153,99     | 1149,55     | 1150,83     | 1147,76     | 1145,49     | 1137,01     | 1134,87     | 1137,36     | 1095,31    |
| 17   | 1037,4                                                                                                                                 | 1022,47   | 1007,6    | 995,79    | 1011,52   | 1053,7    | 1074,69   | 1087,57   | 1107,18   | 1105,38    | 1107,01     | 1106,4      | 1107,67     | 1115,34     | 1114,19     | 1120,75     | 1105,21     | 1083,05     | 1077,76     | 1075,36     | 1056,77     | 1052,24     | 1026,09     | 1006,54    |
| 18   | 972,82                                                                                                                                 | 985,59    | 971,44    | 977,64    | 998,64    | 1021,19   | 1059,41   | 1077,26   | 1099,57   | 1089,85    | 1102,43     | 1103,1      | 1097,66     | 1095,47     | 1106,61     | 1094,18     | 1064,7      | 1073,59     | 1072,21     | 1080,23     | 1052,71     | 1051,9      | 1018,2      | 1003,81    |

|    |             |             |            |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |
|----|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 19 | 948,7<br>5  | 942,9<br>5  | 915,1<br>7 | 926,4<br>9  | 964,9<br>4  | 1003,<br>99 | 1026,<br>27 | 1037,<br>77 | 1065,<br>87 | 1056,<br>21 | 1056,<br>39 | 1053,<br>12 | 1050,<br>79 | 1057,<br>45 | 1057,<br>61 | 1048,<br>7  | 1036,<br>67 | 1026,<br>34 | 1041,<br>9  | 1044,<br>12 | 1016,<br>52 | 1012,<br>16 | 971,5<br>2  | 982,1<br>7  |
| 20 | 978,8<br>1  | 975,3       | 946,4<br>7 | 950,7<br>1  | 988,5<br>8  | 1031,<br>94 | 1044,<br>37 | 1059,<br>19 | 1081,<br>43 | 1079,<br>01 | 1075,<br>62 | 1082,<br>39 | 1075,<br>01 | 1083,<br>28 | 1072,<br>38 | 1070,<br>94 | 1070,<br>32 | 1062,<br>78 | 1058,<br>68 | 1065,<br>84 | 1048,<br>81 | 1023,<br>03 | 1000,<br>03 | 992,6<br>6  |
| 21 | 990,9<br>6  | 990,8<br>1  | 969,6<br>1 | 983,8<br>16 | 1020,<br>16 | 1061,<br>18 | 1076,<br>27 | 1089,<br>86 | 1118,<br>61 | 1123,<br>08 | 1124,<br>27 | 1120,<br>52 | 1117,<br>39 | 1116,<br>32 | 1112,<br>44 | 1115,<br>04 | 1107,<br>32 | 1084,<br>39 | 1088,<br>74 | 1100,<br>41 | 1081,<br>58 | 1070,<br>67 | 1025,<br>92 | 1024,<br>48 |
| 22 | 1033,<br>2  | 1022,<br>83 | 990,1<br>6 | 933,3       | 1019,<br>86 | 1065,<br>54 | 1075,<br>95 | 1092        | 1126,<br>46 | 1128,<br>14 | 1130,<br>04 | 1132,<br>06 | 1130,<br>9  | 1137,<br>01 | 1141,<br>25 | 1136,<br>91 | 1138,<br>83 | 1126,<br>06 | 1126,<br>98 | 1141,<br>77 | 1123,<br>89 | 1126,<br>25 | 1088,<br>51 | 1068,<br>11 |
| 23 | 1032,<br>42 | 1007,<br>8  | 928,1<br>5 | 891,5<br>6  | 920,6<br>2  | 995,6<br>4  | 1033,<br>45 | 1088,<br>77 | 1112,<br>03 | 1132,<br>28 | 1134,<br>37 | 1136,<br>75 | 1141,<br>87 | 1150,<br>96 | 1152,<br>59 | 1151,<br>15 | 1152,<br>93 | 1146,<br>94 | 1147,<br>63 | 1146,<br>01 | 1119,<br>79 | 1057,<br>34 | 953,4<br>3  | 924,5<br>8  |
| 24 | 1025,<br>49 | 1011,<br>24 | 999,4      | 992,1<br>6  | 1025,<br>23 | 1096,<br>34 | 1109,<br>19 | 1123,<br>18 | 1140,<br>28 | 1129,<br>57 | 1136,<br>63 | 1133,<br>18 | 1126,<br>87 | 1118,<br>38 | 1109,<br>46 | 1103,<br>11 | 1101,<br>3  | 1094,<br>54 | 1098,<br>87 | 1079,<br>92 | 1074,<br>78 | 1056,<br>1  | 1030,<br>05 | 1003,<br>12 |
| 25 | 985,4<br>5  | 985,5<br>2  | 982,2<br>1 | 985         | 997,7<br>7  | 1033,<br>12 | 1049,<br>54 | 1065,<br>31 | 1073,<br>42 | 1051,<br>05 | 1055,<br>36 | 1070,<br>44 | 1061,<br>35 | 1066,<br>11 | 1059,<br>85 | 1054,<br>02 | 1056,<br>56 | 1040,<br>51 | 1047,<br>51 | 1056,<br>74 | 1046,<br>46 | 1024,<br>48 | 1024,<br>99 | 994,6<br>9  |
| 26 | 948,9<br>9  | 945,2<br>2  | 877,1<br>8 | 892,0<br>9  | 954,4<br>6  | 979,6<br>9  | 1002,<br>08 | 1017,<br>59 | 1039,<br>78 | 1035,<br>78 | 1038,<br>27 | 1040,<br>24 | 1031,<br>18 | 1038,<br>68 | 1026,<br>2  | 1027,<br>56 | 1026,<br>12 | 1015,<br>45 | 1018,<br>13 | 1026,<br>51 | 1010,<br>15 | 1003,<br>91 | 992,2<br>2  | 976,5<br>9  |
| 27 | 978,8<br>9  | 991,1       | 984,5      | 990,8<br>1  | 984,5<br>6  | 1002,<br>25 | 1023,<br>16 | 1020,<br>7  | 1040,<br>04 | 1060,<br>12 | 1066,<br>14 | 1072,<br>39 | 1092,<br>87 | 1098,<br>85 | 1059,<br>21 | 1035,<br>35 | 1037,<br>48 | 1020,<br>71 | 1023,<br>81 | 1062,<br>08 | 1043,<br>2  | 1053,<br>4  | 1030,<br>47 | 1002,<br>27 |
| 28 | 1004,<br>97 | 1004,<br>92 | 998,3<br>2 | 982,6<br>1  | 992,8<br>8  | 1004,<br>84 | 1030        | 1053,<br>63 | 1086,<br>74 | 1073,<br>33 | 1078,<br>1  | 1082,<br>48 | 1072,<br>76 | 1081,<br>76 | 1058,<br>07 | 1060,<br>55 | 1062,<br>58 | 1044,<br>25 | 1048,<br>67 | 1051,<br>54 | 1060,<br>53 | 1043,<br>9  | 1042,<br>55 | 1005,<br>17 |
| 29 | 1007,<br>01 | 1002,<br>13 | 996,1      | 974,9<br>6  | 977,6<br>2  | 997,8<br>9  | 987,4<br>5  | 998,6<br>6  | 1020,<br>74 | 1018,<br>04 | 1022,<br>82 | 1026,<br>64 | 1037,<br>77 | 1041,<br>13 | 1038,<br>24 | 1040,<br>51 | 1044,<br>98 | 1031,<br>21 | 1033,<br>97 | 1040,<br>93 | 1059,<br>25 | 1063,<br>54 | 1044,<br>41 | 1011,<br>52 |
| 30 | 1005,<br>24 | 1007,<br>87 | 997,0<br>3 | 898,9<br>1  | 933,3<br>8  | 985,8<br>3  | 930,7<br>5  | 979,7<br>7  | 1012,<br>63 | 1020,<br>54 | 1018,<br>2  | 1026        | 1037,<br>46 | 1041,<br>22 | 1037,<br>83 | 1042,<br>73 | 1052,<br>71 | 1040,<br>29 | 1049,<br>35 | 1045,<br>2  | 1057,<br>1  | 1062,<br>52 | 1060,<br>43 | 1032,<br>95 |

Таблица 2 – Дифференцированная по уровням напряжения ставка тарифа на услуги по передаче электрической энергии за содержание электрических сетей предельного уровня нерегулируемых цен, рублей/МВт в месяц без НДС

|                                                                                             | Уровень напряжения |           |           |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|-----------|-----------|-----------|
|                                                                                             | ВН                 | СН I      | СН II     | НН        |
| Ставка тарифа на услуги по передаче электрической энергии за содержание электрических сетей | 542795,17          | 707353,37 | 750348,08 | 783507,50 |

## Приложение 2. Технические параметры частотного преобразователя

Таблица 2.1 –Технические параметры преобразователя частоты фирмы “Schneider Electric” серии Altivar 212

|                                                           |                                                                                                                                                         |
|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Параметры                                                 | Преобразователь частоты “Schneider Electric” серии Altivar 212 управления электродвигателем центробежного насоса                                        |
| Установленная мощность, кВт                               | 60                                                                                                                                                      |
| Класс защиты корпуса                                      | IP 21                                                                                                                                                   |
| Регулирование                                             | VVC+, Fluxcurrent/Servo (алгоритм управления серводвигателями с постоянными магнитами)                                                                  |
| Контроллеры                                               | ПИД – контроллеры: процесса и скорости, ПИ – контроллер момента                                                                                         |
| Операторские панели                                       | Цифровая или графическая(русский язык, персональное меню, меню изменений, QuickSetup меню, кнопка Info, графики переходных процессов, защита паролем)   |
| Встроенный контроллер                                     | Встроенный контроллер условий SmartLogicController (20 шагов), логические функции могут работать независимо от цикла контроллера                        |
| Т окружающей среды, °C                                    | -10 – 40                                                                                                                                                |
| Охлаждение                                                | Два способа охлаждения: регулируемый по температуре съемный вентилятор или через заднюю стенку и внешний радиатор (возможность установки в шкафу IP 66) |
| Изменяемая частота коммутации                             | 2 – 16 кГц                                                                                                                                              |
| Режим случайной модуляции для снижения акустического шума | Присутствует                                                                                                                                            |
| Автоматическая оптимизация энергопотребления              | Снижает намагничивание в зависимости от нагрузки, в HVAC системах позволяет дополнительно экономить до 3 – 5 % электроэнергии                           |
| Функция управления перенапряжением (OverVoltageControl)   | Присутствует                                                                                                                                            |
| Функция Kinetik Back-Up                                   | Присутствует                                                                                                                                            |
| Функция точного останова                                  | Присутствует                                                                                                                                            |
| Функция подхвата вращающегося двигателя                   | Присутствует                                                                                                                                            |
| Функция архивирования в режиме реального времени          | Присутствует                                                                                                                                            |
| Силовые опции                                             | Тормозные резисторы, L-C фильтры, dU/dt фильтры, фильтры гармоник (AHF)                                                                                 |
| Опции                                                     | General purpose I/O option, Encoder option, Resolver option, Relay option, Safe PLC Interface, 24 V DC Supply option, Programmable Motion Controller    |
| Встроенный RS - 485                                       | Присутствует                                                                                                                                            |
| Встроенный порт USB для программирования от ПК            | Присутствует                                                                                                                                            |
| Коммуникационные опции                                    | PROFIBUS, DeviceNet                                                                                                                                     |

### Приложение 3. Характеристики насоса

Таблица 3.1– Напорная характеристика насоса *Grundfos NB 80-200/211 Premium*

| $Q \left[ \frac{\text{м}^3}{\text{ч}} \right]$ | $n \left[ \frac{\text{об}}{\text{мин}} \right]$ |       |       |       |        |       |        |              |
|------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|--------------|
|                                                | 2900                                            | 2500  | 2000  | 1500  | 1000   | 500   | 100    |              |
| 0                                              | 5.88                                            | 4.370 | 2.797 | 1.573 | 0.699  | 0.175 | 0.0070 | $p$<br>[бар] |
| 40                                             | 6,076                                           | 4,516 | 2,890 | 1,626 | 0,723  | 0,181 | 0,0072 |              |
| 60                                             | 6,125                                           | 4,552 | 2,913 | 1,639 | 0,728  | 0,182 | 0,0073 |              |
| 80                                             | 6,154                                           | 4,574 | 2,927 | 1,647 | 0,732  | 0,183 | 0,0073 |              |
| 100                                            | 6,125                                           | 4,552 | 2,913 | 1,639 | 0,728  | 0,182 | 0,0073 |              |
| 120                                            | 6,076                                           | 4,516 | 2,890 | 1,626 | 0,723  | 0,181 | 0,0072 |              |
| 140                                            | 6,027                                           | 4,479 | 2,867 | 1,613 | 0,7167 | 0,179 | 0,0072 |              |
| 160                                            | 5,880                                           | 4,370 | 2,797 | 1,573 | 0,699  | 0,175 | 0,0070 |              |
| 180                                            | 5,684                                           | 4,224 | 2,704 | 1,521 | 0,676  | 0,169 | 0,0068 |              |
| 200                                            | 5,488                                           | 4,079 | 2,610 | 1,468 | 0,653  | 0,163 | 0,0065 |              |
| 220                                            | 5,165                                           | 3,838 | 2,456 | 1,381 | 0,614  | 0,154 | 0,0061 |              |
| 240                                            | 4,812                                           | 3,576 | 2,289 | 1,287 | 0,572  | 0,143 | 0,0057 |              |
| 260                                            | 4,410                                           | 3,277 | 2,098 | 1,180 | 0,524  | 0,131 | 0,0052 |              |



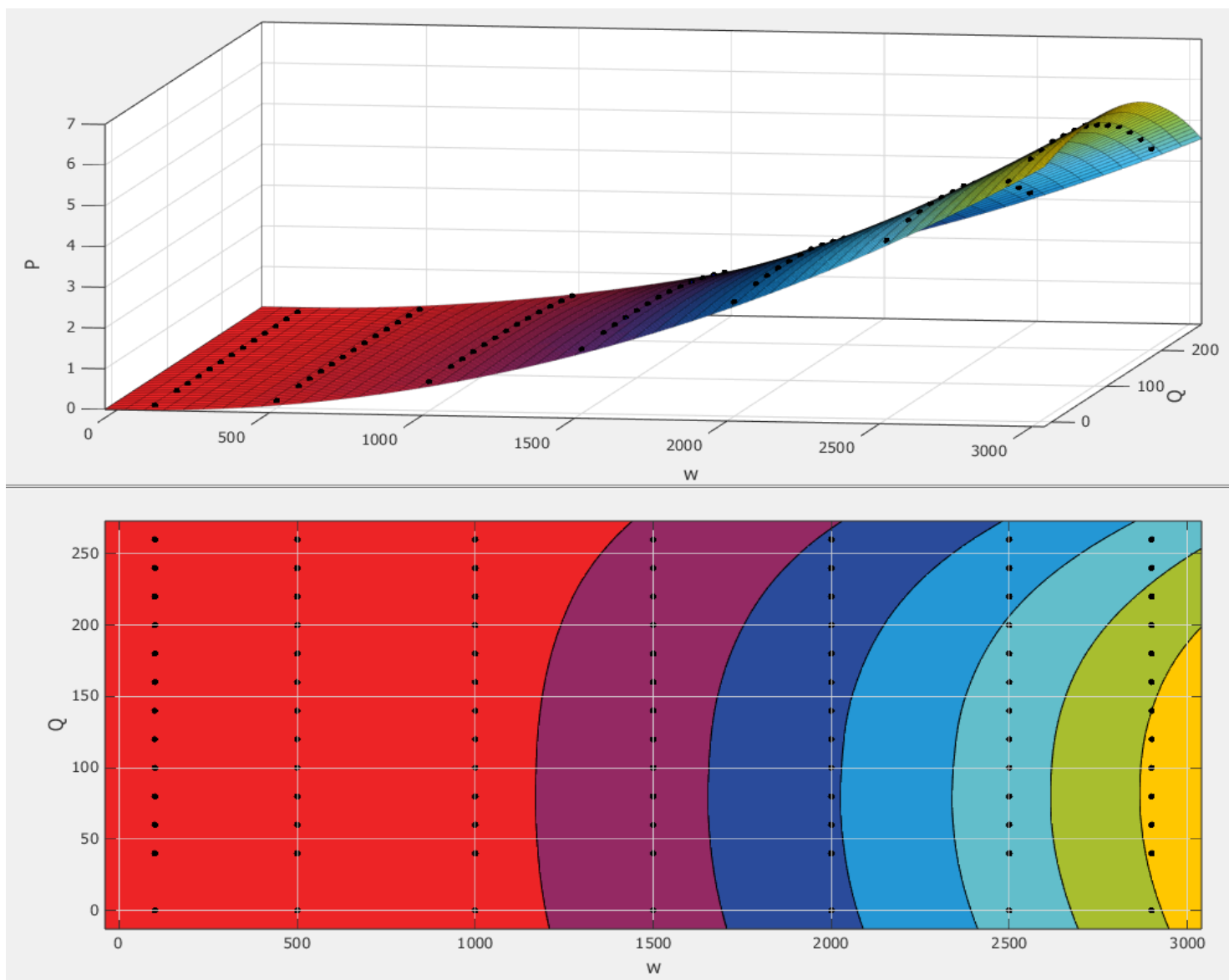


Рисунок 3. 1 – Напорная характеристика насоса Grundfos NB 80-200/211 Premium

Таблица 3.2–Мощностная характеристика насоса Grundfos NB 80-200/211 Premium

| $Q \left[ \frac{\text{м}^3}{\text{ч}} \right]$ | $n \left[ \frac{\text{об}}{\text{мин}} \right]$ |       |       |      |      |       |       |             |
|------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------|-------|------|------|-------|-------|-------------|
|                                                | 2900                                            | 2500  | 2000  | 1500 | 1000 | 500   | 100   |             |
| 0                                              | 15000                                           | 9610  | 4920  | 2076 | 615  | 76,9  | 0,62  |             |
| 40                                             | 19000                                           | 12173 | 6232  | 2629 | 779  | 97,4  | 0,779 | $P$<br>[Вт] |
| 60                                             | 22000                                           | 14095 | 7216  | 3044 | 902  | 112,8 | 0,902 |             |
| 80                                             | 24500                                           | 15696 | 8036  | 3390 | 1005 | 125,6 | 1,005 |             |
| 100                                            | 27000                                           | 17298 | 8857  | 3736 | 1107 | 138,4 | 1,107 |             |
| 120                                            | 29000                                           | 18579 | 9512  | 4013 | 1189 | 148,6 | 1,189 |             |
| 140                                            | 31000                                           | 19860 | 10168 | 4290 | 1271 | 158,9 | 1,271 |             |
| 160                                            | 32900                                           | 21078 | 10792 | 4553 | 1349 | 168,6 | 1,349 |             |
| 180                                            | 35000                                           | 22423 | 11481 | 4843 | 1435 | 179,4 | 1,435 |             |
| 200                                            | 37000                                           | 23704 | 12137 | 5120 | 1517 | 189,6 | 1,517 |             |
| 220                                            | 38800                                           | 24858 | 12727 | 5369 | 1591 | 198,9 | 1,591 |             |
| 240                                            | 40500                                           | 25947 | 13285 | 5605 | 1661 | 207,6 | 1,661 |             |
| 260                                            | 42000                                           | 26908 | 13777 | 5812 | 1722 | 215,3 | 1,722 |             |

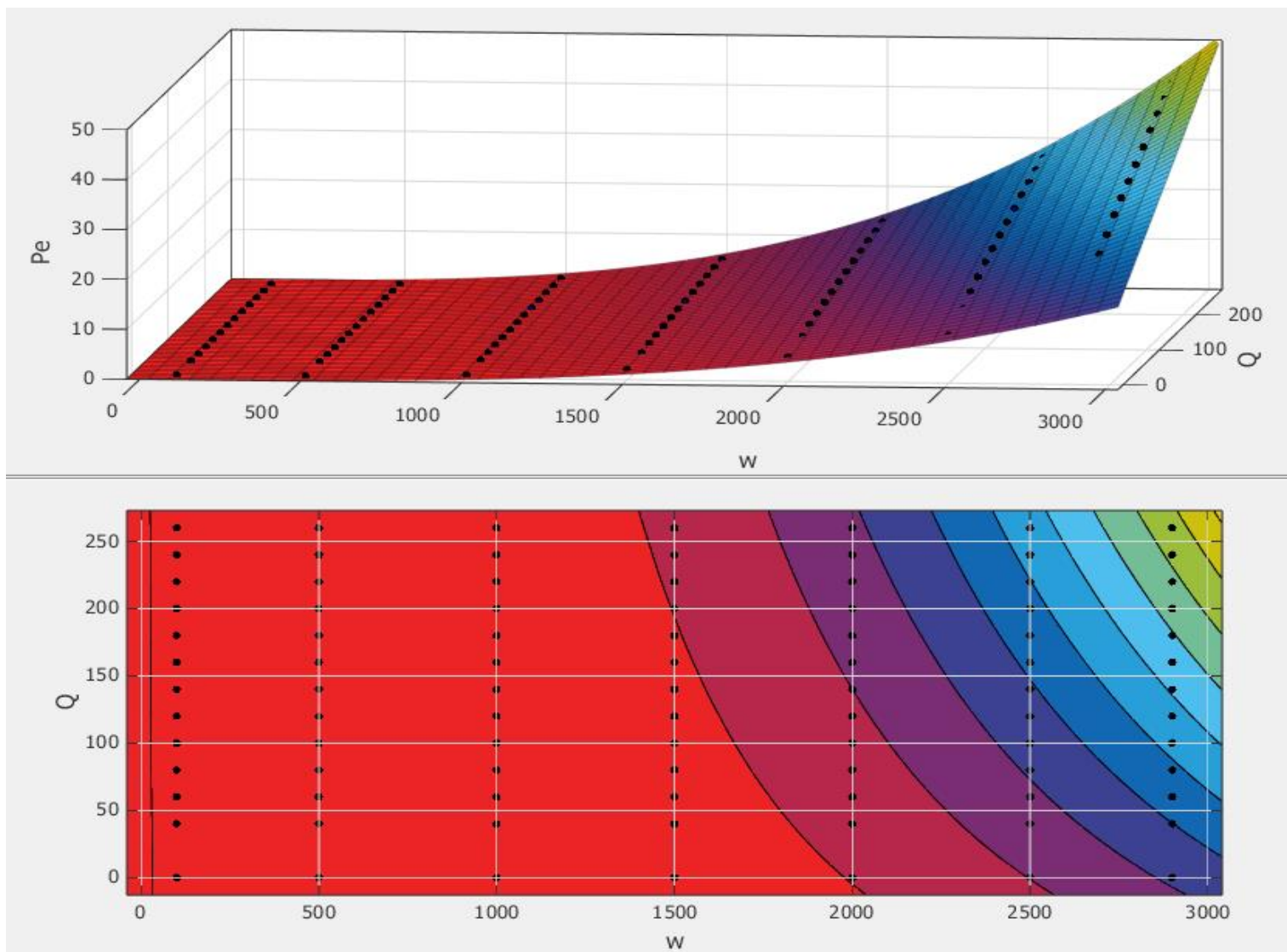


Рисунок 3. 2 – Мощностная характеристика насоса Grundfos NB 80-200/211 Premium

«УТВЕРЖДАЮ»



Директор ООО «Томскводоканал»

Е.М.Яворская

«11» февраля 2013г.

## Акт

об использовании результатов научно-исследовательской работы

Бабинович Дарьи Евгеньевны

Настоящим актом подтверждается использование результатов по теме диссертационной работы «Оптимизация режимов электропотребления на объектах водоснабжения (на примере ООО «Томскводоканал»)), выполненной под руководством д.ф-м.н, профессора Энергетического института Томского политехнического университета Кабышева А.В. и к.т.н., доцента Энергетического института Томского политехнического университета Шутова Е.А и начальника Энергослужбы ООО «Томскводоканал» Богуша И.И.

Предметом внедрения являются следующие научные разработки диссертационной работы:

- минимизация отклонений фактического потребления электроэнергии от плановых значений за счет внедрения методов прогнозирования, исследованных в работе, а именно методов однофакторного и многофакторного прогнозирования, таких как: метода авторегрессии проинтегрированного скользящего среднего (ARIMA), метод ARMA/GARCH и метод нейронных сетей;
- расчет и выбор оптимальных ценовых категорий на приобретение электроэнергии для объектов ООО «Томскводоканал»;
- проведение анализа суточных графиков нагрузки с выделением основных влияющих на потребление электроэнергии факторов.

Применение основных результатов работы позволило снизить средневзвешенный тариф предприятия на покупку электроэнергии. Годовой экономический эффект от внедрения данных результатов непосредственно на технологические объекты предприятия составляет не менее десяти миллионов рублей.

Начальник Энергослужбы

И.И.Богуш