

**Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Казанский государственный энергетический университет»**

На правах рукописи



**Альзаккар Ахмад**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ  
ТРАНСФОРМАТОРОВ ПУТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПОТРЕБЛЕНИЯ  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ПРИМЕРЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО  
КОМПЛЕКСА СИРИЙСКОЙ АРАБСКОЙ РЕСПУБЛИКИ**

Специальность 2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы

**Диссертация**

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент

**Грачева Елена Ивановна**

**Казань – 2024**

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|   |    |
|---|----|
| ВВЕДЕНИЕ.....   | 6  |
| 1. РЕГУЛИРОВАНИЕ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ.....   | 13 |
| 1.1. Обзор литературы.....  | 13 |
| 1.2. Регулирование потребления электроэнергии с помощью выравнивания графиков нагрузки.....   | 16 |
| 1.2.1. Учет основных параметров при выравнивании графиков нагрузки.....   | 17 |
| 1.2.2. Основные виды Потребителей-регуляторов и их использование для режимных мероприятий.....  | 19 |
| 1.2.3. Требования к надежности электроснабжения потребителей.....   | 20 |
| 1.3. Особенности технико-экономических оценок энергоэффективности работы оборудования при регулировании режимов электропотребления.....                             | 21 |
| 1.4. Выводы по главе.....   | 25 |
| 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ГРАФИКОВ НАГРУЗОК СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПОДСТАНЦИИ «КАБУН-1» И АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ СРОК СЛУЖБЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ..... | 26 |
| 2.1. Анализ и исследование электропотребления объектов промышленной зоны г. Адра (Сирийская Арабская Республика).....   | 26 |
| 2.1.1. Исходные графики нагрузок объектов промышленной зоны г. Адра и их параметры.....   | 26 |
| 2.1.2. Нагрузки электропотребителей Нового сектора промышленного района г.Адра (Сирийская Арабская Республика).....   | 38 |
| 2.2. Исследование основных факторов, определяющих срок службы трансформаторов, на примере подстанции «Кабун-1».....   | 42 |
| 2.2.1. Виды условий охлаждающей среды для трансформаторов.....  | 42 |

|  |           |
|--|-----------|
| 2.2.2. Значения допустимой температуры масла и температуры обмоток исследуемых трансформаторов.....  | 43        |
| 2.2.3. Анализ влияния значений температуры окружающей среды на выбор номинальной мощности трансформаторов.....   | 48        |
| 2.2.4. Оценка температуры нагрева обмоток трансформаторов 33/11кВ подстанции «Кабун-1» в зависимости от коэффициентов загрузки .....                   | 50        |
| 2.2.5. Оценка температуры нагрева обмоток трансформаторов 33/11 кВ подстанции «Кабун-1» в зависимости от фактических суточных мощностей нагрузки ..... | 53        |
| 2.2.6. Оценка относительной величины срока службы трансформаторов 33/11 кВ подстанции «Кабун-1» .....  | 60        |
| 2.3. Реализация компьютерной модели имитационного моделирования схемы электроснабжения с трансформаторами 33/11 кВ подстанции «Кабун-1» .....          | 63        |
| 2.4. Характерные суточные графики полной мощности нагрузки некоторых производств и промышленных предприятий .....                                      | 66        |
| 2.5. Выводы по главе .....   | 67        |
| <b>3. СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСХОДНЫХ ГРАФИКОВ НАГРУЗОК ЭЛЕКТРОПОТРЕБИТЕЛЕЙ ПОДСТАНЦИИ «КАБУН-1» И ИХ АППРОКСИМИРУЮЩИЕ ФУНКЦИИ.....</b>         | <b>69</b> |
| 3.1. Исходные графики нагрузок трансформаторов 11/0,4 кВ Прядильно-ткацкой фабрики и их параметры.....   | 69        |
| 3.2. Определение значений статистических характеристик нагрузок трансформаторов 11/0,4 кВ Прядильно-ткацкой фабрики.....                               | 77        |
| 3.3. Особенности применения эмпирических уравнений для описания графических зависимостей мощности нагрузок от времени .....                            | 87        |

|  |            |
|--|------------|
| 3.4. Выбор вида аппроксимирующей функции суточных графиков активных мощностей нагрузок трансформаторов Прядильно-ткацкой фабрики (первое приближение).....                                     | 88         |
| 3.4.1. Виды функций аппроксимации (первое приближение) .....   | 88         |
| 3.4.2. Исследование и анализ исходных графиков активных нагрузок и аппроксимированных графических зависимостей активной мощности нагрузок Прядильно-ткацкой фабрики (первое приближение) ..... | 89         |
| 3.5. Выбор вида аппроксимирующей функции суточных графиков активных мощностей нагрузок трансформаторов Прядильно-ткацкой фабрики (второе приближение).....                                     | 97         |
| 3.5.1. Виды функций аппроксимации (второе приближение) .....   | 97         |
| 3.5.2. Исследование и анализ исходных графиков активных нагрузок и аппроксимированных графических зависимостей активной мощности нагрузок Прядильно-ткацкой фабрики (второе приближение) ..... | 98         |
| 3.6. Применение методики выбора функций аппроксимации графиков активных нагрузок производств Прядильно-ткацкой фабрики .....   | 109        |
| 3.7. Применение методики выбора функций аппроксимации графиков активных нагрузок коммунально-бытового сектора, получающего питание от трансформаторов подстанции «Кабун-1» .....               | 115        |
| 3.8. Выводы по главе .....   | 117        |
| <b>4. ВЫБОР И АНАЛИЗ СПОСОБОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ .....</b>   | <b>119</b> |
| 4.1. Анализ и исследование способов выравнивания графиков нагрузки электропотребителей, получающих питание от трансформаторов подстанции «Кабун-1» – вариант 1, вариант 2 .....                | 119        |
| 4.2. Параметры графиков нагрузок трансформаторов 33/11 кВ подстанции «Кабун-1» – вариант 1, вариант 2 .....  | 120        |

|  |     |
|--|-----|
| 4.3. Алгоритм оценки влияния вида графиков нагрузки на продолжительность срока эксплуатации трансформаторов подстанции «Кабун-1» – вариант 2 .....   | 132 |
| 4.4. Анализ и исследование способов выравнивания графиков нагрузки электропотребителей, получающих питание от трансформаторов подстанции «Кабун-1» – вариант 3 .....                               | 138 |
| 4.5. Параметры графиков нагрузок трансформаторов 33/11 кВ подстанции «Кабун-1» – вариант 3 .....   | 139 |
| 4.6. Алгоритм оценки влияния вида графиков нагрузки на продолжительность срока эксплуатации трансформаторов подстанции «Кабун-1» – вариант 3 .....   | 144 |
| 4.7. Техничко-экономическое обоснование внедрения разработанных мероприятий для повышения эффективности эксплуатации и увеличения срока службы трансформаторов 33/11 кВ подстанции «Кабун-1» ..... | 149 |
| 4.8. Выводы по главе .....   | 153 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....   | 155 |
| СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ .....   | 158 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....  | 161 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А .....   | 175 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Б .....   | 188 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ В .....   | 191 |

## ВВЕДЕНИЕ

### Актуальность темы исследования

Проблема регулирования режимов электропотребления на промышленных и непромышленных объектах в условиях экстремально высоких температур окружающей среды Сирийской Арабской Республики (САР) имеет достаточную сложность и отличается многообразием влияющих на данный процесс факторов. При этом необходимым условием является учет воздействия различных факторов на суммарное электропотребление, а также фактической стоимости электроэнергии (ЭЭ), передаваемой конечному потребителю.

Неравномерность электропотребления в разные промежутки времени отрицательно влияет на эксплуатационные характеристики электрооборудования. Как известно, существуют различные способы регулирования режимов потребления ЭЭ – использование резервных источников питания и перетоков мощности от близкорасположенных объектов; разработка и внедрение организационных мероприятий в электротехнических комплексах и системах; применение различных систем охлаждения элементов электрооборудования. В представленной диссертационной работе предлагаются способы регулирования потребления ЭЭ от трансформаторов с  $S_{ном}=20$  МВА, напряжением 33/11 кВ, установленных на подстанции (ПС) «Кабун-1» (г. Адра, САР). В исследуемой системе электроснабжения (СЭС) существует проблема внеплановых отключений питания электропотребителей с последующим отключением от основной электроэнергетической системы в условиях дефицита мощности и фактического отсутствия регулирования режимов электропотребления. Как показывают проведенные исследования, регулирование режимов потребления ЭЭ в условиях экстремально высоких температур окружающей среды, определяется не только сложностью топологии схем, составом электрооборудования, дефицитом мощности ЭЭ, но и температурой среды. Высокие температуры приводят к перегреву элементов электрооборудования.

В климатических условиях САР температура окружающей среды может достигать значений +48 °С и более, что приводит к нагреванию обмоток силовых трансформаторов выше допустимых значений и, следовательно, к сокращению срока их службы. В условиях экономических санкций со стороны недружественных стран по отношению к САР, особенно остро стоит проблема закупки электрооборудования, в частности, силовых трансформаторов больших мощностей.

Поэтому повышение эффективности эксплуатации и увеличение срока службы силовых трансформаторов является актуальной задачей для электроэнергетики САР. Существующие в настоящее время способы регулирования потребления ЭЭ достаточно затратны и не учитывают негативное влияние высоких температур окружающей среды на функционирование элементов электрооборудования.

На основании вышеизложенного, задача разработки способов регулирования режимов электропотребления для повышения эффективности эксплуатации электрооборудования и силовых трансформаторов в условиях экстремально высоких температур окружающей среды, имеет актуальность для проведения фундаментальных и прикладных исследований.

#### **Степень разработанности темы исследования**

Теоретические и экспериментальные исследования в области регулирования режимов потребления ЭЭ проводились рядом ученых, среди которых можно выделить как российских – В.И. Гордеев, И.В. Жежеленко, Ю.С. Железко, Л.М. Зельцбург, В.И. Идельчик, В.С. Иванов, Е.А. Конюхова, И.И. Надтока, В.И. Соколов, В.В. Шевченко, так и зарубежных – А. Agnetis, W. Basha Mohamed, A. Baggini, M. Daghrah, R. Gouws, D. Koval, W. Mielczarski, Minh Ngo, R. Singh.

**Объект исследования** – электротехнический комплекс промышленной зоны г. Адра (САР), в состав которого входит ПС «Кабун-1».

**Предмет исследования** – способы регулирования потребления ЭЭ.

**Цель работы** – увеличение технического ресурса силовых трансформаторов напряжением 33/11 кВ ПС «Кабун-1» с помощью регулирования потребления ЭЭ.

**Идея работы** – повышение эффективности эксплуатации СЭС и увеличение срока службы силовых трансформаторов подстанции «Кабун-1» Сирийской Арабской Республики с помощью способов регулирования потребления ЭЭ, основанных на выравнивании графиков нагрузки при их аппроксимации суммой гармонических функций косинуса.

**Задачи исследования**

1. Провести анализ состава электропотребителей, входящих в электротехнический комплекс промышленной зоны г. Адра (САР) и статистических характеристик их графиков нагрузок.

2. Выявить причины перегрузок трансформаторов ПС «Кабун-1» и определить способы их устранения с учетом климатических условий САР.

3. Разработать методику оценки температуры перегрева элементов трансформатора в конце интервала времени постоянной нагрузки в зависимости от коэффициента загрузки и условий окружающей среды.

4. Разработать методику определения параметров аппроксимации суточных графиков нагрузок с помощью гармонических функций косинуса.

5. Разработать мероприятия по регулированию потребления ЭЭ от трансформаторов 33/11 кВ ПС «Кабун-1» и провести технико-экономическое обоснование эффективности внедрения разработанных мероприятий.

6. Разработать алгоритм оценки относительной величины срока службы силовых трансформаторов за рассматриваемый период времени характерной нагрузки.

**Научная новизна работы заключается в следующем**

1. Впервые разработана методика оценки температуры перегрева элементов трансформатора в конце интервала времени постоянной нагрузки, отличающаяся от известных возможностью обеспечения максимальной энергоэффективности эксплуатации при учете параметров работы трансформаторов (загрузки трансформатора и климатических условий).

2. Впервые разработана методика определения параметров аппроксимации при выравнивании суточных графиков нагрузок, отличающаяся от существующих

использованием гармонических функций косинуса и позволяющая сохранить значения и времена наступления максимумов и минимумов графиков на примере электропотребителей трансформаторов 11/0,4 кВ.

3. Предложены мероприятия по регулированию потребления ЭЭ, основанные на выравнивании графиков нагрузки при их аппроксимации суммой гармонических функций косинуса с учетом вариации нагрузки и коэффициента заполнения графиков нагрузки, на примере трансформаторов 33/11 кВ ПС «Кабун-1», способствующие увеличению их срока службы в климатических условиях САР.

4. Впервые разработан алгоритм оценки относительного срока службы силовых трансформаторов, отличающийся от известных учетом параметров режимов потребления ЭЭ нагрузками.

**Теоретическая значимость результатов работы** заключается в развитии теории и разработке способов регулирования потребления ЭЭ для повышения эффективности эксплуатации электрооборудования и увеличения срока службы силовых трансформаторов.

**Практическая значимость результатов работы**

1. Результаты исследований, используемые при проектировании и эксплуатации СЭС, способствуют повышению эффективности управления режимами электропотребления и увеличению технического ресурса силовых трансформаторов с учетом климатических условий.

2. Результаты проведенных диссертационных исследований внедрены в проектную и эксплуатационную деятельность Ассоциации «Росэлектромонтаж», АО «Сетевая компания» – «Приволжские электрические сети» и Сирийской компании по производству цемента и строительных материалов.

3. Полученные в диссертации результаты используются в учебном процессе Казанского Государственного Энергетического Университета при подготовке студентов, обучающихся по направлению 13.03.02 – «Электроэнергетика и электротехника» (Электроснабжение).

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Учет температуры перегрева масла и обмоток силовых трансформаторов в конце интервала времени постоянной нагрузки в зависимости от коэффициента загрузки трансформаторов и температуры окружающей среды позволяет обеспечить оптимальные условия эксплуатации электрооборудования в условиях жаркого климата САР.

2. Математические модели аппроксимации суточных графиков нагрузок с помощью гармонических функций косинуса позволяют эффективно управлять режимами электропотребления нагрузок трансформаторов 11/0,4 кВ.

3. Предлагаемые мероприятия по регулированию потребления ЭЭ нагрузками от трансформаторов 33/11 кВ ПС «Кабун-1» способствуют повышению эффективности эксплуатации электрооборудования и увеличению относительного срока службы силовых трансформаторов более, чем в 2 раза.

**Методы исследований.** При проведении исследований используются методы теории электротехники, теории вероятностей, методы математического и компьютерного моделирования в программной среде MATLAB/Simulink. Результаты работы получены с помощью экспериментальных и компьютерных исследований, расчетных и фактических данных с промышленных объектов и предприятий г. Адра.

### **Достоверность полученных результатов**

Достоверность полученных автором данных достигается выбором математического аппарата, соответствующего поставленным задачам, корректностью принимаемых допущений, соответствием результатов, получаемых в процессе математического моделирования, а также результатам, полученным в процессе практической верификации.

### **Соответствие диссертации паспорту научной специальности**

Диссертационная работа соответствует следующим пунктам паспорта научной специальности 2.4.2 – «Электротехнические комплексы и системы»:

– п. 2: разработка научных основ проектирования, создания и эксплуатации электротехнических комплексов, систем и их компонентов;

– п. 4: исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов, систем и их компонентов в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях, диагностика электротехнических комплексов.

**Личный вклад автора** заключается в определении и проработке целей исследования, постановке задач, разработке алгоритмов и моделей, разработке мероприятий для повышения эффективности эксплуатации и увеличения срока службы электрооборудования.

#### **Апробация результатов исследования**

Результаты диссертационной работы представлялись и докладывались на следующих конференциях: на VIII Национальной научно-практической конференции «Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве», г. Казань, КГЭУ, 2022 г.; на III Всероссийской научно-практической конференции «Энергетика будущего – цифровая трансформация», г. Липецк, ЛГТУ, 2022 г.; на VII Международной научно-практической конференции «Энергетика и энергосбережение: теория и практика», г. Кемерово, КузГТУ, 2022 г.; на конференции «Энергетические системы (ICES)» г. Белгород, БГТУ им. В.Г. Шухова, 2022 г.; на Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири», г. Иркутск, ИРНТУ, 2023 г.; на Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения», г. Казань, КГЭУ, 2023 г.; на международной научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг», г. Сочи, (ICIE) 2023 г.; на международной научно-технической конференции «Автоматизация» (AutoCon), г. Сочи, 2023 г.

**Публикации.** По результатам исследования опубликованы 14 научных работ в том числе 2 публикации в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международной базе данных Scopus; 4 статьи в рецензируемом научном издании, входящем в перечень ВАК РФ; 8 публикаций в материалах докладов международных и всероссийских конференций.

**Структура и объем диссертации.**

Диссертация изложена на 194 страницах и состоит из четырех глав, введения и заключения, содержит 55 рисунков, 64 таблицы, 152 формулы, список литературы из 101 наименования, 3 приложения.

# 1. РЕГУЛИРОВАНИЕ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

## 1.1. Обзор литературы

Значительное количество силовых трансформаторов (ТР), находящихся в эксплуатации во всем мире, требует исследований, направленных на повышение надёжности их работы. При этом необходимо выявить причины, влияющие на сокращение срока службы из-за электрических или механических повреждений и тяжелых условий эксплуатации. Мониторинг состояния трансформаторов и точное прогнозирование оставшегося срока их работы имеет большое значение для коммунальных служб или независимых владельцев, особенно, учитывая высокую стоимость замены [1-3].

В современных условиях развития САР особое внимание уделяется повышению качества электроснабжения промышленной зоны города Адра, который является одним из крупнейших в САР. В 2022 г. новые промышленные предприятия введены в строй в г. Адра, где в настоящее время насчитывается 31 предприятие, включая, пищевые, машиностроительные и химические, продукция которых на местном рынке составляет более 60 %.

Далее представлен анализ близких по области исследования работ некоторых ученых.

Так, Э.Ю. Абдуллазяновым, Е.И. Грачевой, А. Альзаккаром, S. Valtchev в [4] определены закономерности изменения относительной величины срока службы трансформаторов при реализации различных технических мероприятий, а Yifan Xu,

Y. Xu, F. Liu, X. Lai в [5] предлагают комплексный метод определения срока вывода из эксплуатации силовых трансформаторов с учётом как экономического, так и физического срока службы. Исследование проводится согласно следующему алгоритму: во-первых, в соответствии с моделью стоимости жизненного цикла (LCC) силовых трансформаторов создаётся математическая модель начальной стоимости, стоимости эксплуатации и обслуживания, стоимости отказа и стоимости утилизации. Затем на основе среднегодовой кривой (LCC) получают

экономический ресурс силовых трансформаторов. Во-вторых, физический срок службы силовых трансформаторов рассчитывают, корректируя ожидаемый срок службы с учётом коэффициента нагрузки, температурного фактора и фактора влажности, а далее уточняют его с помощью статистики отказов в процессе эксплуатации. Наконец, теоретический срок вывода из эксплуатации силовых трансформаторов определяется всесторонним учётом как экономического, так и физического срока службы.

К. Chitnavis, N. R. Bhasme в [6] рассматривают метод оценки срока службы силового трансформатора, т. е. метод расчёта фактического индекса работоспособности, включающий дополнительные факторы, такие как предварительная нагрузка, состояние ввода, старение, анализ растворенных газов (DGA), качества масла, коэффициента мощности. Учёт данных дополнительных диагностических факторов снижает недостатки традиционного метода оценки и даёт точный результат.

К.Т. Muthanna, А. Sarkar; К. Das, К. Waldner в [7] разработали и сравнили новые методы оценки срока службы изоляции блоков повышенной мощности генераторов и трансформаторов на электростанциях. Часовая нагрузка и температура окружающей среды, полученные в результате мониторинга состояния, используются для оценки режима работы оборудования. В данной работе исследуются методы моделирования для оценки коэффициентов нагрузки и температуры окружающей среды с использованием предварительных режимов эксплуатации. Расчётные коэффициенты нагрузки и температуры окружающей среды вводятся в модели для оценки срока службы изоляции.

А. Alzakkar, Е. Gracheva, Y. Samofalov в [8] провели исследования расчётной мощности нагрузок бытовых электропотребителей и сравнение с экспериментальной потребляемой мощностью в г. Адра.

Е.И. Грачева, О.В. Наумов, Е.А. Федотов в [9] исследовали и выявили режимы работы силовых трансформаторов для определения оптимальной нагрузки, при которой КПД трансформатора достигнет максимального значения,

также предложили варианты повышения КПД работы силовых трансформаторов промышленных предприятий.

В.А. Анищенко, В.В. Иванов в [10] разработали метод определения допустимой продолжительности систематической неаварийной перегрузки распределительного масляного трансформатора с учётом изменения коэффициента перегрузки за интервал времени его работы и, соответственно, изменения теплового состояния трансформатора.

А. Chatterjee, N.K. Roy в [11] представили анализ и моделирование характеристик растворенных газов в трансформаторном масле с целью разработки графика замены и фильтрации масла, который, в свою очередь, регулирует качество масла при возникновении неисправности. Разработана марковская модель для прогнозирования технического состояния элементов конструкции трансформатора. Математическая модель может применяться для оптимизации некоторых конструктивных параметров трансформатора, в котором возникла неисправность, в зависимости от частоты обслуживания и выбора ожидаемого срока службы трансформатора.

Д. С. Серебренников, В. Г. Гольдштейн в [12] исследуют актуальные вопросы оценки фактического состояния силовых трансформаторов со значительным сроком службы с помощью тепловизионной диагностики. Представлены виды дефектов и оценка потенциальных возможностей их локализации с помощью тепловизионной диагностики.

Однако, в приведенных исследованиях отсутствует проработка вопросов регулирования потребления ЭЭ от силовых трансформаторов для оценки и возможного увеличения их относительного срока службы. Поэтому тема представленной диссертационной работы является актуальной.

## 1.2. Регулирование потребления электроэнергии с помощью выравнивания графиков нагрузки

Как известно, режимы потребления электроэнергии (ЭЭ) отражаются соответствующими графиками электрической нагрузки, которые характеризуются показателями [13-16]:

1) Коэффициентом заполнения графика нагрузки активной мощности

$$K_{зг} = \frac{P_c}{P_{\max}}, \quad (1.1)$$

где  $P_c$  – средняя активная мощность;  $P_{\max}$  – максимальная нагрузка.

2) Годовым (суточным, месячным) числом часов использования максимума нагрузки потребителя

$$T_{\max} = \frac{W_i}{P_{\max}}, \quad (1.2)$$

где  $W_i$  – величины электропотребления.

3) Коэффициентом спроса  $K_c$

$$K_c = \frac{P_p}{P_n}, \quad (1.3)$$

где  $P_p$  – расчетная мощность;  $P_n$  – суммарная номинальная мощность.

Неравномерность электропотребления во времени, как правило, отрицательно сказывается на работе электрооборудования, а также стабильности и эффективности функционирования промышленных объектов и предприятий.

Существуют способы повышения стабильности электропотребления, такие, как [17, 18]:

1. создание резервных источников питания для объектов и предприятий;
2. применение возможных перетоков мощности с близкорасположенными объектами;
3. разработка и внедрение соответствующих организационных мероприятий.

Для того, чтобы получать максимальный экономический эффект от выравнивания графиков нагрузок предприятий, требуются разработка рациональных мероприятий [19-21].

### 1.2.1. Учет основных параметров при выравнивании графиков нагрузки

График изменения потребления активной мощности Прядильно-ткацкой фабрикой г. Адра Сирийской Арабской Республики (САР) [22-25] показан на рисунке 1.1.

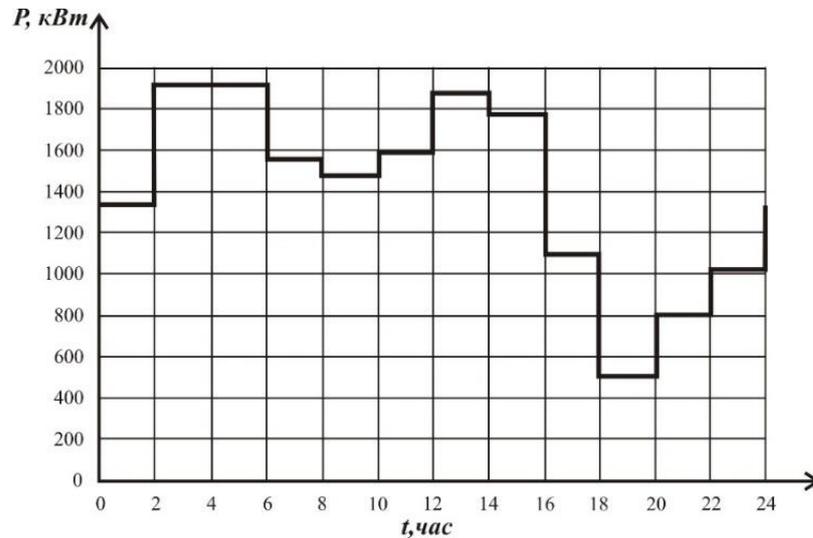


Рисунок 1.1 – Суточный график активной мощности нагрузки Прядильно-ткацкой фабрики в Сирийской Арабской Республике

Основными характеристиками графиков нагрузок [25] являются:

1. наибольшая нагрузка ( $P_{\text{наиб}}$ );
2. наименьшая нагрузка ( $P_{\text{км}}$ );
3. средняя нагрузка

$$P_{\text{ср}} = \frac{\sum(P_i \cdot \Delta t_i)}{\sum \Delta t_i}, \quad (1.4)$$

где  $P_i$  – значение активной мощности нагрузки на  $i$ -ом интервале графика;  $\Delta t_i$  – длительность данного интервала;

4. среднеквадратичная нагрузка

$$P_{\text{ск}} = \sqrt{\frac{\sum(P_i^2 \cdot \Delta t_i)}{\sum \Delta t_i}}, \quad (1.5)$$

5. коэффициент заполнения графика нагрузки

$$K_{\text{зп}} = \frac{P_{\text{ск}}}{P_{\text{ср}}}, \quad (1.6)$$

6. коэффициент формы графика нагрузки

$$K_{\phi} = \frac{P_{\text{ск.}}}{P_{\text{ср}}}; \quad (1.7)$$

7. коэффициент неравномерности нагрузки

$$K_{\text{к}} = \frac{P_{\text{км}}}{P_{\text{наиб}}}; \quad (1.8)$$

8. Время использования наибольшей активной мощности нагрузки

$$T_{\text{наиб}} = \frac{W_{\text{пот}}}{P_{\text{наиб}}}. \quad (1.9)$$

где  $W_{\text{пот}}$  – суточная величина потребленной электроприемниками ЭЭ;  $P_{\text{наиб}}$  – наибольшая мощность нагрузки.

В случае, когда график нагрузки имеет вид кривой, то

$$\begin{aligned} W_{\text{пот}} &= \int_0^{24} P(t) \cdot dt; \\ T_{\text{наиб.а}} &= \frac{\int_0^{24} P(t) \cdot dt}{P_{\text{наиб.а}}}. \end{aligned} \quad (1.10)$$

При известных графиках реактивной и полной мощности нагрузок значения времени использования наибольшей реактивной мощности нагрузки  $T_{\text{наиб.р}}$  и времени использования наибольшей полной мощности нагрузки  $T_{\text{наиб.полн}}$  определяются

$$\begin{aligned} T_{\text{наиб.р}} &= \int_0^{24} \frac{Q(t) \cdot dt}{Q_{\text{наиб}}}; \\ T_{\text{наиб.полн}} &= \frac{\int_0^{24} S(t) \cdot dt}{S_{\text{наиб}}}. \end{aligned} \quad (1.11)$$

При этом данные параметры имеют особенно важное значение, когда виды графиков нагрузок активной и реактивной мощности существенно различаются.

### 1.2.2. Основные виды потребителей-регуляторов и их использование для режимных мероприятий

Потребители-регуляторы [26] – потребители с таким продуманным режимом работы, который способствует снижению максимума нагрузки Прядельно-ткацкой фабрики в пиковые часы и повышению ее нагрузки в часы ночного провала графика нагрузки (ГН).

Как показано на рисунке 1.2, Потребители-регуляторы можно разделить по отраслевому признаку, режимам работы и способам выравнивания ГН.

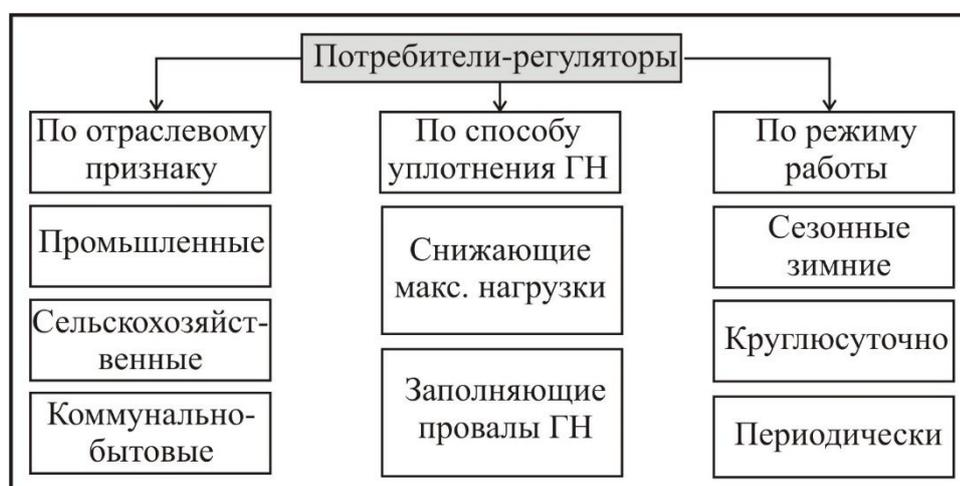


Рисунок 1.2 – Классификация Потребителей-регуляторов

По способу выравнивания ГН всех Потребителей-регуляторов можно разделить на [27]:

1. ПР способствуют снижению максимума нагрузки, на пример: древесно-стружечные предприятия (ДСП), горно-обогатительный комбинат (ГОК), ферросталеплавильные печи (феррост. печи).

2. ПР специально создаваемые в целях использования избыточной ночной ЭЭ, на пример: тепловые электроустановки с системой аккумуляции низкотемпературного тепла [28-30].

### 1.2.3. Требования к надежности электроснабжения потребителей

В настоящее время, когда техническое состояние электросетевого комплекса САР оставляет желать лучшего, нередки случаи отключения предприятий от энергосистемы. Согласно Приказу Министерства Энергетики Сирийской Арабской Республики от 01 ноября 2021 номер 1341 об утверждении «Правил разработки и применения графиков аварийного ограничения режима потребления ЭЭ» для ликвидации аварийных ситуаций в электрических сетях ежегодно разрабатываются графики, регламентирующие аварийные ограничения потребителей особой группы [31].

Аварийная броня электроснабжения – минимальный уровень энергоснабжения, при котором обеспечивается остановка промышленного или иного потребителя без порчи оборудования.

На рисунке 1.3 показана схема обеспечения аварийной брони.

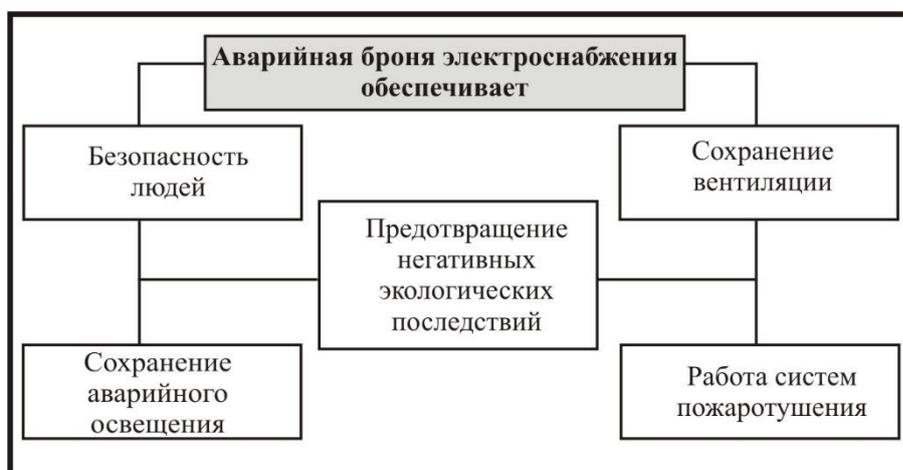


Рисунок 1.3 – Схема обеспечения аварийной брони

В случае существования технологической брони все потребители, входящие в графики ограничений электроснабжения, как правило, ограничиваются в получении ЭЭ, при авариях в энергосистемах, а в случае отсутствия брони, отключаются. Поэтому необходимо разрабатывать акты на технологическую бронь для тех электропотребителей, которым требуется бесперебойное электроснабжение.

### 1.3. Особенности технико-экономических оценок энергоэффективности работы оборудования при регулировании режимов электропотребления

Среднее значение максимальной величины получасового нагрузки [13, 32, 33]

$$P_{\text{макс}} = P_{\text{сред}} + \beta_{\text{ск}} \cdot \sigma_{\text{ск}}, \quad (1.12)$$

где  $P_{\text{сред}}$  – среднее значение величины получасового нагрузки промышленного объекта;  $\beta_{\text{ск}}$  – значение статистического;  $\sigma_{\text{ск}}$  – значение среднеквадратического отклонения величин получасовых мощностей нагрузок.

При использовании двухставочного тарифа [34-39] значения  $\beta_{\text{ст}}$  и  $P_{\text{макс}}$  выбираются в соответствии с минимумом суммарной величины затрат

$$\Delta Z = \Delta П_1 + \Delta П_2 + \Delta П_3 + C, \quad (1.13)$$

где  $\Delta Z$  – изменение суммарных затрат предприятия за сутки;  $\Delta П_1$  – вариация платы за величину заявленной договорной мощности;  $\Delta П_2$  – вариация платы за превышение величины данной мощности;  $\Delta П_3$  – вариация платы за величину потребленной ЭЭ;  $C$  – стоимость продукции.

В случае неиспользования промышленным объектом Потребителей-регуляторов ( $\Delta П_3 = 0$  и  $C = 0$ ), тогда (1.10) можно представить

$$\Delta Z_1 = \Delta П_1 + \Delta П_2. \quad (1.14)$$

$\Delta П_1$  вычисляется

$$\Delta П_1 = \frac{a_{\text{осн}}}{n} (P_{\text{макс}} - P_{\text{сред}}), \quad (1.15)$$

где  $a_{\text{осн}}$  – значение основной ставки двухставочного тарифа за величину заявленного кВт мощности;  $n$  – число дней в году.

$\Delta П_2$  вычисляется

$$\Delta П_2 = 2k_{\text{штр}} \frac{a_{\text{осн}}}{n} \rho [P_{\text{сред}}^{\text{ус}} - P_{\text{макс}}], \quad (1.16)$$

где  $P_{\text{сред}}^{\text{ус}}$  – средняя величина усечённой совокупности значений получасовых мощностей нагрузки;  $k_{\text{штр}}$  – величина штрафного коэффициента.

С учетом использования нормального распределения нагрузок

$$\rho(P > P_{\text{макс}}) = 0,5 - \Phi(u), \quad (1.17)$$

где  $\Phi(u)$  – выражение для вычисления интеграла вероятности.

$$\Phi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^u e^{-0,5t^2} dt. \quad (1.18)$$

$$\varphi = \frac{P_{\max} - P_{\text{сред}}}{\sigma}. \quad (1.19)$$

$P_{\text{сред}}^{\text{ус}}$  вычисляем

$$P_{\text{сред}}^{\text{ус}} = P_{\text{сред}} + \sigma^2 \varphi(u), \quad (1.20)$$

где  $\varphi(u)$  – значение плотности одностороннего усеченного распределения.

$$\varphi(u) = \frac{1}{\sigma(1-\tau_0)} \varphi_{\text{н}}(u), \quad (1.21)$$

где  $\tau_0$  – значение степени усечения

$$\tau_0 = 0,5 + \Phi(u), \quad (1.22)$$

Используя (1.15), (1.16), (1.17), (1.19), вычислим значение минимизируемого функционала (1.14)

$$\Delta Z_1 = \frac{a_{\text{осн}}}{n} \left( \begin{array}{l} P_{\max} - P_{\text{сред}} + 2k_{\text{штр}}[0,5 - \Phi(u)] \times \\ [P_{\text{сред}} - P_{\max} + \sigma^2 \varphi(u)] \end{array} \right), \quad (1.23)$$

На рисунке 1.4 показан график изменения вероятности значения получасовой мощности нагрузки объекта.

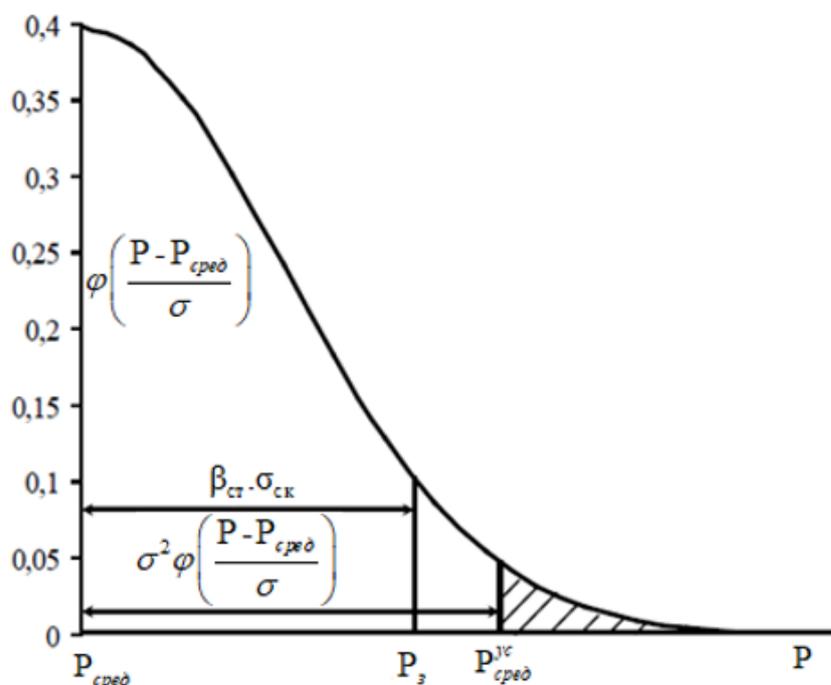


Рисунок 1.4 – График изменения вероятности значения получасовой мощности нагрузки объекта относительно заявленного значения получасовой максимальной мощности

Рисунок 1.5 показывает график суммарных общих затрат и их составляющих от значения  $\beta_{ст}$  для различных  $k_{штр}$

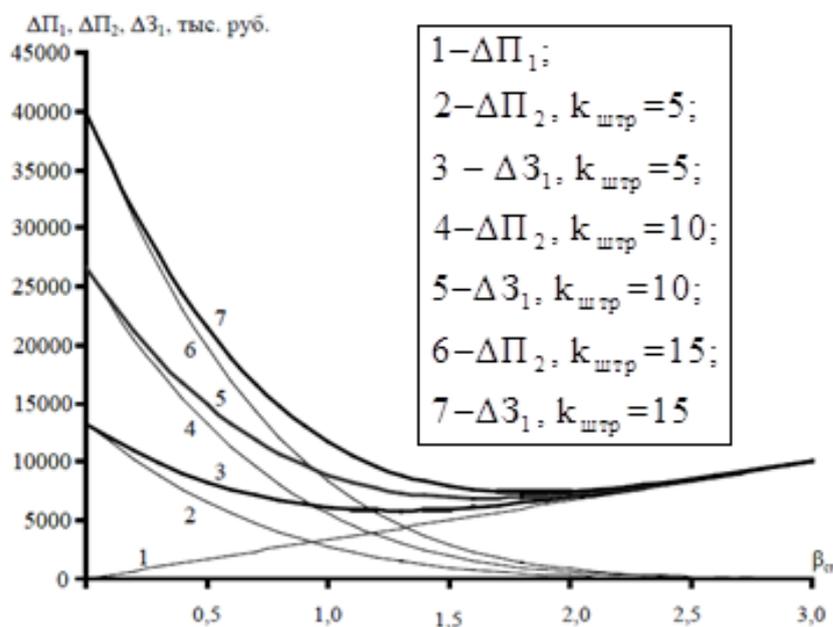


Рисунок 1.5 – График суммарных затрат без ограничения мощности нагрузки

Из (1.13) следует критерий оптимизации  $\Delta П_3$ :

$$\Delta З_2 = \Delta П_1 + \Delta П_3 + C, \quad (1.24)$$

где  $\Delta П_3$  – суточное изменение платы за потребленную ЭЭ.

$$\Delta П_3 = b \cdot \rho (P > P_{\max}) \Delta W_{\Sigma}, \quad (1.25)$$

где  $b$  – дополнительная ставка двухставочного тарифа (кВт/ч);  $\Delta W_{\Sigma}$  – суммарное суточное изменение электропотребления

$$\Delta W_{\Sigma} = \Delta W_1 + \Delta W_2 + \Delta W_3. \quad (1.26)$$

Состав суммарной суточной величины изменения потребления ЭЭ:

1. Среднее за сутки уменьшение потребления ЭЭ  $\Delta W_1$

$$\Delta W_1 = \frac{2\sigma}{\sigma_v} \sqrt{2\pi} (1 - \tau_0) \varphi_H(u) [P_{\text{сред}} - P_{\max}], \quad (1.27)$$

где  $\sigma_v$  – среднеквадратичная производная мощности получасовой нагрузки.

2. Величина дополнительных средних за сутки затрат ЭЭ для восстановления технологических циклов

$$\Delta W_2 = d \Delta W_1; \quad d > 1. \quad (1.28)$$

3. Средняя за сутки величина увеличения потребления ЭЭ в интервале провала мощности нагрузок

$$\begin{aligned} \Delta W_3 &= k\Delta W_1; \\ k &\leq 1. \end{aligned} \quad (1.29)$$

Используя (1.15), (1.17), (1.20), (1.25) – (1.29) получим соотношение (1.30) для критерия оптимизации динамики величины среднесуточных затрат

$$\Delta Z_2 = \frac{a_{\text{осн}}}{n} \left( \begin{aligned} & [P_{\text{макс}} - P_{\text{сред}}] + \frac{2\sigma}{\alpha} \sqrt{2\pi} [0,5 - \Phi(u)] \times \\ & [b(k + d - 1) + (1 - k)y_{\text{уд}}] \times \\ & (1 + 2\pi(1 - \tau_0)^2 \varphi(u) [P_{\text{сред}} - P_{\text{макс}}]) \end{aligned} \right). \quad (1.30)$$

где  $\alpha$  – значение коэффициента затухания корреляционной связи;

Рисунок 1.6 показывают результаты вычислений величины затрат  $\Delta Z_2$  с учетом значения удельного ущерба.

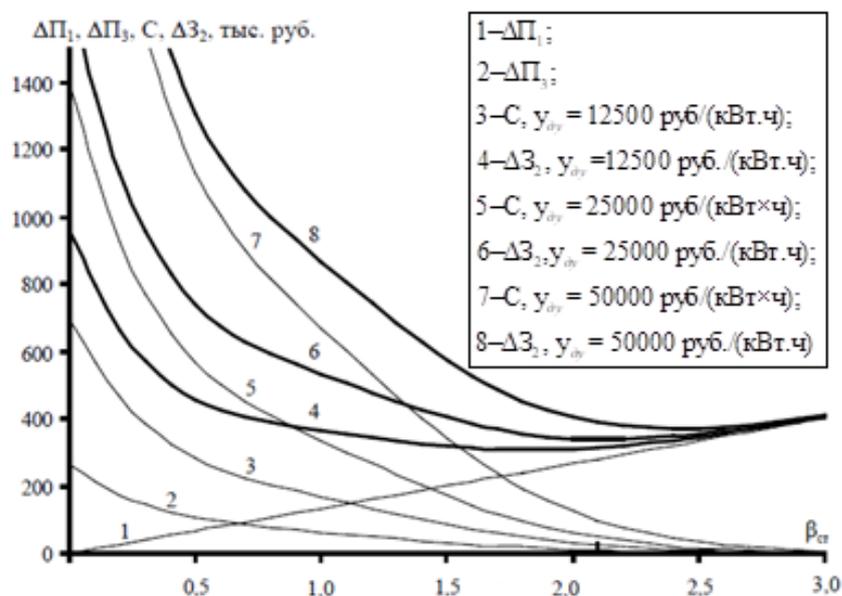


Рисунок 1.6 – График суммарных затрат с учетом ограничения мощности нагрузки

#### **1.4. Выводы по главе**

1. Приведен анализ некоторых научных работ учёных, проводящих исследования срока службы силовых трансформаторов.
2. Проанализированы существующие проблемы регулирования потребления ЭЭ в промышленности с помощью выравнивания графиков нагрузки.
3. Представлены основные параметры, виды Потребителей-регуляторов и требования к надёжности электроснабжения потребителей при выравнивании графиков нагрузок.
4. Показана экономическая эффективность регулирования потребления ЭЭ при использовании различных методик.

## 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ГРАФИКОВ НАГРУЗОК СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПОДСТАНЦИИ «КАБУН-1» И АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ СРОК СЛУЖБЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ

### 2.1. Анализ и исследование электропотребления объектов промышленной зоны г. Адра (Сирийская Арабская Республика)

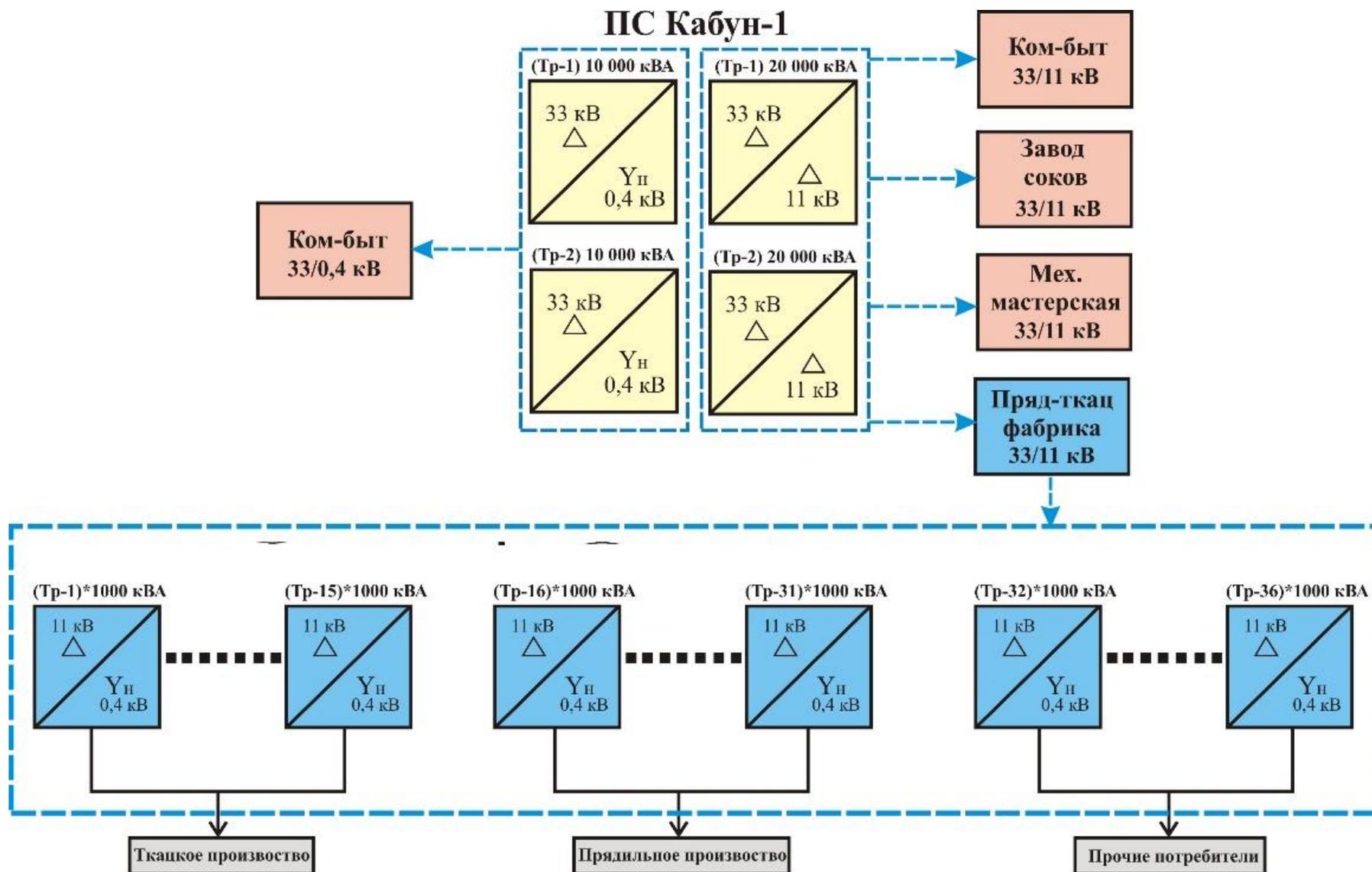
#### 2.1.1. Исходные графики нагрузок объектов промышленной зоны г. Адра и их параметры

Промышленные предприятия г. Адра получают питание от подстанции (ПС) «Кабун-1» на напряжениях 11 кВ и 0,4 кВ. На ПС установлены 2 трансформатора с  $S_{ном}=20$  МВА; 33/11 кВ и 2 трансформатора с  $S_{ном}=10$  МВА; 33/0,4 кВ.

От трансформаторов с  $S_{ном}=20$  МВА получают питание коммунально-бытовые (Ком-быт.) потребители, Механическая (Мех.) мастерская, Завод соков (режим работы в одну смену) и Прядильно-ткацкая (Пряд-ткац.) фабрика.

Потребителем наибольшей мощности является Пряд-ткац. фабрика, работающая в двухсменном режиме [40-43]. На фабрике установлены 36 трансформаторов с  $S_{ном}=1$  МВА. Фабрика получает питание от ПС «Кабун-1» по кабельным линиям на  $U=11$  кВ.

От трансформаторов с  $S_{ном}=10$  МВА; 33/0,4 кВ получают питание ряд потребителей коммунально-бытового сектора на 0,4 кВ. Распределительные сети 11 и 0,4 кВ – радиальные. На рисунке 2.1 показана принципиальная схема электроснабжения г. Адра [44, 45].



*Рисунок 2.1 – Принципиальная схема электроснабжения г. Адра*

Для исследования режимов электропотребления использованы следующие параметры графиков нагрузки [45, 46]:

1. Среднее значение полной мощности нагрузки  $S_{\text{сред}}$

$$S_{\text{сред}} = \frac{\sum_{i=1}^{24} S_i}{24}. \quad (2.1)$$

2. Максимальное значение  $S_{\text{макс}}$ .

3. Эффективное значение полной мощности

$$S_{\text{эффектив}} = \sqrt{\frac{S_1^2 t + S_2^2 t + S_3^2 t + \dots}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots}}. \quad (2.2)$$

4. Среднеквадратическое отклонение полной мощности нагрузки

$$\sigma_{\text{СНГ}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{24} (S_i - S_{\text{сред}})^2}{24}}. \quad (2.3)$$

5. Значение вариации нагрузки

$$\gamma_{\text{СНГ}} = \frac{\sigma_{\text{СНГ}}}{S_{\text{сред}}}. \quad (2.4)$$

6. Коэффициент заполнения графика нагрузки

$$K_{\text{зп}} = \frac{S_{\text{сред}}}{S_{\text{макс}}}. \quad (2.5)$$

Расчёты проведены с использованием программы «EXCEL», результаты записаны в таблицах и показаны на рисунках. На рисунке 2.2 даны графические зависимости изменения суточной суммарной мощности нагрузок трансформаторов 33/11 кВ, электропотребителей Пряд-ткац. фабрики.

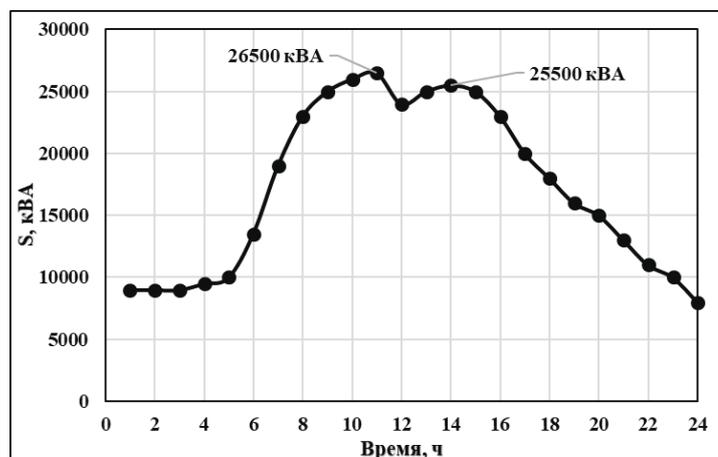
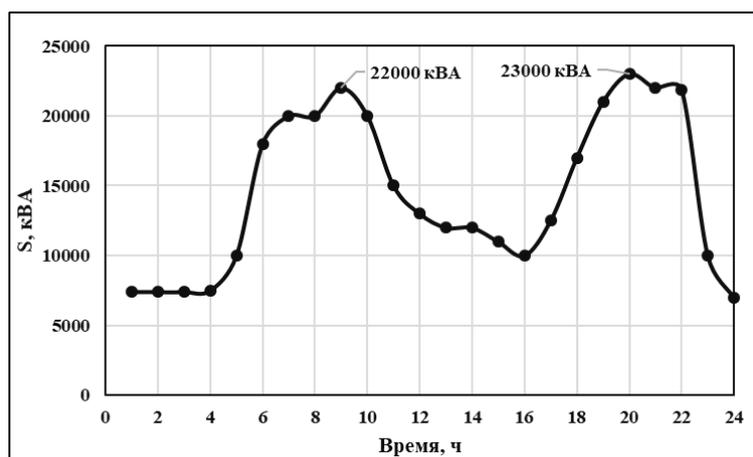


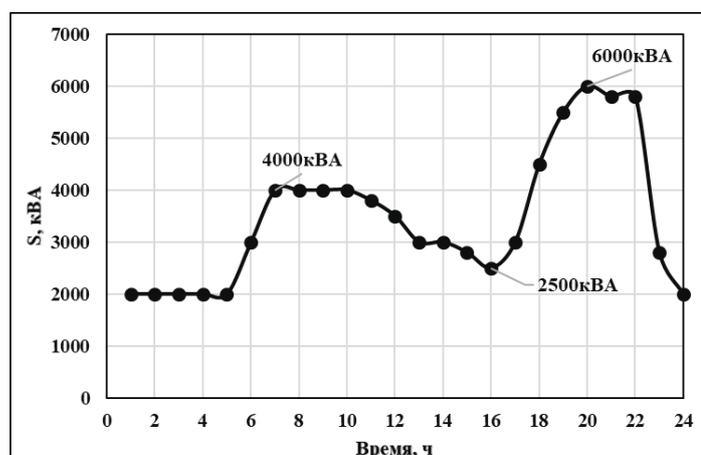
Рисунок 2.2 – Изменения суточной суммарной полной мощности Прядильно-ткацкой фабрики

На рисунке 2.2 показано, что график мощности нагрузки Пряд-ткац. фабрики содержит максимумы – утренний с 10:00 ч до 12:00 ч около 26,5 МВА и дневной – с 12:00 ч до 16:00 ч – около 25,5 МВА. На рисунке 2.3 даны графические зависимости изменения суточной суммарной мощности нагрузок трансформаторов 33/11 кВ, Ком-быт. потребителей.



*Рисунок 2.3 – Изменения суточной суммарной полной мощности коммунально-бытовых потребителей на 11 кВ*

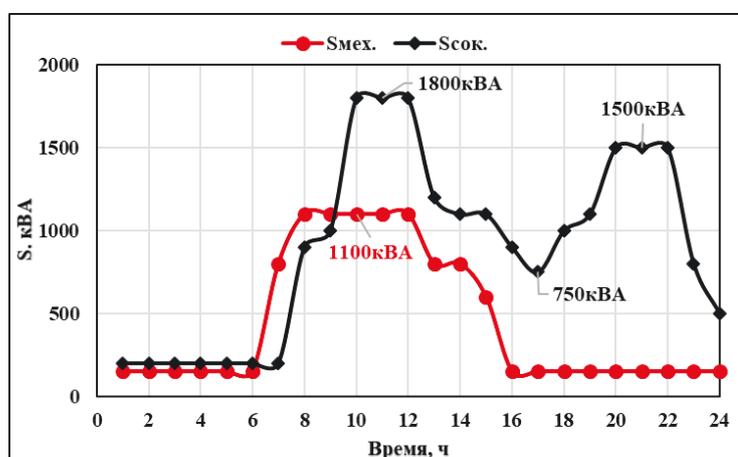
На рисунке 2.3 показано, что график мощности с Ком-быт. потребителей на 11кВ содержит максимумы – утренний с 06:00 ч до 11:00 ч – около 22 МВА и вечерний – с 18:00 ч до 22:00 ч – около 23 МВА. На рисунке 2.4 приведен график нагрузки Ком-быт. потребителей, питающихся от трансформаторов 33/0,4 кВ.



*Рисунок 2.4 – Изменение суточной суммарной полной мощности коммунально-бытовых потребителей на 0,4 кВ*

На рисунке 2.4 показано, что график мощности нагрузки Ком-быт. потребителей на 0,4 кВ содержит максимумы – утренний с 06:00 ч до 11:00 ч – около 4 МВА и вечерний – с 17:00 ч до 22:00 ч – около 6 МВА, снижение нагрузки до 2,5 МВА наблюдается с 14:00 ч до 17:00 ч.

На рисунке 2.5 показаны графики нагрузок Механической мастерской и Завода по производству соков (питающихся от трансформаторов 33/11 кВ), которые характеризуются наличием резких максимумов и минимумов потребления ЭЭ.



*Рисунок 2.5 – Изменение суточной суммарной полной мощности Механической мастерской и Завода соков*

На рисунке 2.5 показано, что:

1. график мощности нагрузки Мех. мастерской содержит максимумы – утренний с 08:00 ч до 12:00 ч – около 1,1 МВА;
2. график мощности Завода по производству соков содержит максимумы – утренний с 10:00 ч до 12:00 ч – около 1,8 МВА и вечерний- с 20:00 ч до 22:00 ч – около 1,5 МВА, снижение нагрузки до 0,75 МВА наблюдается с 16:00 ч до 18:00 ч.

На рисунке 2.6 даны графические зависимости изменения суточной суммарной полной мощности ПС «Кабун-1».

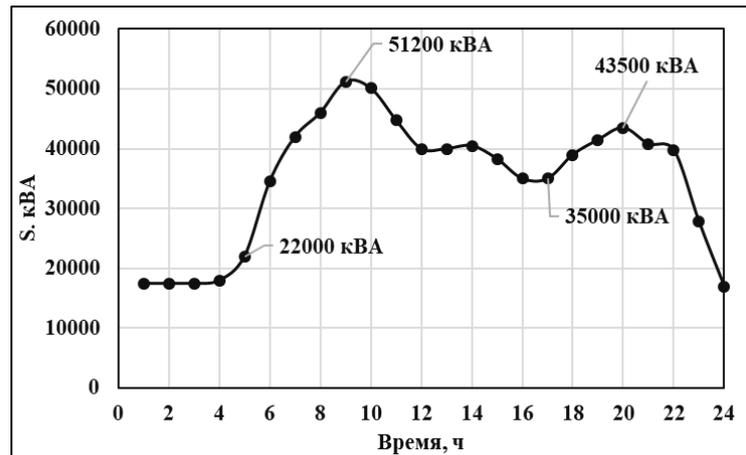


Рисунок 2.6 – Изменение суточной суммарной полной мощности ПС «Кабун-1»

На рисунке 2.6 показано, что полная мощность: в утреннее время – с 8:00 ч до 10:00 ч составляет, примерно, 51,2 МВА, в вечернее время – с 19:00 ч до 21:00 ч примерно равна 43,5 МВА, с 23:00 ч до 05:00 ч уменьшается до 22 МВА.

На рисунке 2.7 показаны графические зависимости изменения суточной суммарной полной мощности трансформаторов 33/11 кВ ПС «Кабун-1».

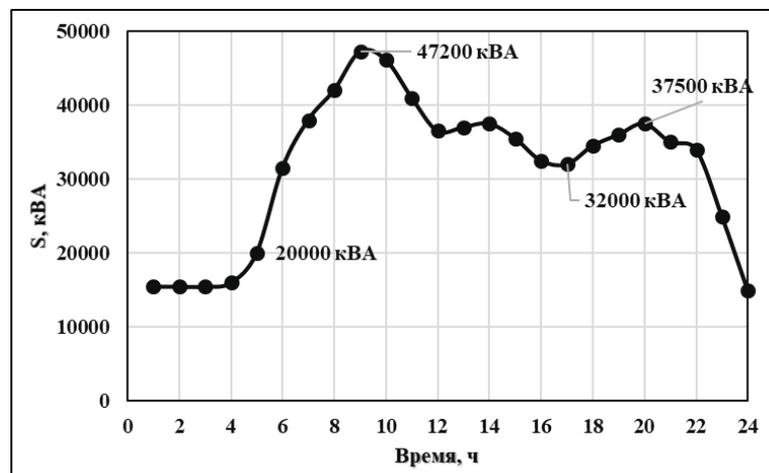


Рисунок 2.7 – Изменение суточной суммарной полной мощности трансформаторов 33/11 кВ ПС «Кабун-1»

На рисунке 2.7 показано, что график мощности нагрузки трансформаторов 33/11 кВ ПС «Кабун-1» содержит следующие максимумы: утренний – с 8:00 ч до 10:00 ч – около 47,2 МВА, вечерний – с 18:00 ч до 22:00 ч – около 37,5 МВА; снижение нагрузки до 20 МВА наблюдается с 23:00 ч до 05:00 ч.

Данные графики (рисунки 2.6 и 2.7) показывают:

1. Во время утренней смены с 8:00 ч до 10:00 ч, максимум нагрузки снижается на 4 МВА (51,2 – 47,2) МВА.

2. Во время вечерней с 19:00 ч до 21:00 ч, максимум нагрузки снижается на 6 МВА (43,5 – 37,5) МВА, это происходит потому, что трансформатор с  $S_{ном}=10$  МВА не участвует в питании нагрузки.

3. Во время ночной смены с 23:00 ч до 05:00 ч, максимум нагрузки снижается на 2 МВА (22 – 20) МВА.

В таблице 2.1 показаны результаты вычислений значений суммарной мощности нагрузок и значений полной мощности нагрузок трансформаторов 33/11кВ, установленных на ПС «Кабун-1».

Таблица 2.1 – Результаты расчетов параметров суммарной нагрузки ПС «Кабун-1»

| Параметры              | ПС «Кабун-1»      | ТР 33/11 кВ       | Пряд-ткац.         | Мех. мастерская | Завод соков        | Ком-быт. 11 кВ    | Ком-быт. 0,4 кВ   |
|------------------------|-------------------|-------------------|--------------------|-----------------|--------------------|-------------------|-------------------|
| $S_{сред}, МВА$        | 37 971            | 31 513            | 16 104             | 448             | 902                | 14 460            | 3 458             |
| $S_{макс}, МВА$        | 51 200            | 47 200            | 26 500             | 1 100           | 1 800              | 23 000            | 6 000             |
| Интервал максимума(ч)  | 8 – 10<br>19 – 21 | 8 – 10<br>19 – 21 | 10 – 12<br>13 – 15 | 8 – 12          | 10 – 12<br>20 – 22 | 8 – 10<br>19 – 21 | 7 – 10<br>19 – 21 |
| $K_{зн}$               | 0,68              | 0,67              | 0,58               | 0,41            | 0,5                | 0,63              | 0,58              |
| $\sigma_{S_{нг}}, МВА$ | 10 778            | 9 895             | 6 803              | 401             | 554                | 5 550             | 1 281             |
| $S_{эффektiv}, МВА$    | 36 594            | 33 029            | 17 482             | 601             | 1 059              | 15 490            | 3 688             |
| $\gamma_{S_{нг}}$      | 0,31              | 0,30              | 0,42               | 0,89            | 0,61               | 0,38              | 0,37              |

В таблицах 2.2 и 2.3 представлен сравнительный анализ суммарной полной мощности нагрузок электропотребителей ПС «Кабун-1». Установлено, что значение вариации нагрузки практически не меняется ( $0,31 \approx 0,30$ ) для потребителей трансформаторов 33/11 кВ ПС «Кабун-1».

Таблица 2.2 – Значения соотношений мощности (в процентах) для графиков суммарной мощности нагрузки ПС «Кабун-1»

| Параметры      | ПС «Кабун-1» | Пряд-ткац. | Мех. мастерская | Завод соков | Ком-быт. 11 кВ | Ком-быт. 0,4 кВ |
|----------------|--------------|------------|-----------------|-------------|----------------|-----------------|
| $S_{сред}, \%$ | 100          | 42,2       | 1,2             | 2,4         | 38,1           | 9,1             |
| $S_{макс}, \%$ | 100          | 53,7       | 2,15            | 3,5         | 44,9           | 11,7            |

Таблица 2.3 – Значения соотношений мощности (в процентах) для графиков полной мощности нагрузки трансформаторов 33/11 кВ ПС «Кабун-1»

| Параметры      | Тр-33/11 кВ | Пряд-ткац. | Мех. мастерская | Завод соков | Ком-быт. 11 кВ |
|----------------|-------------|------------|-----------------|-------------|----------------|
| $S_{сред}, \%$ | 100         | 51,1       | 1,4             | 2,9         | 45,9           |
| $S_{макс}, \%$ | 100         | 58,2       | 2,3             | 3,8         | 48,7           |

Данные таблицы 2.1 показывают, что вариация мощности нагрузок Пряд-ткац. фабрики и Завода соков принимается равной  $0,43 \div 0,61$ , а для Механической мастерской  $0,89$ . Коэффициент корреляции [47, 48] измеряет прямую связь двух переменных.

Данные переменные показывают положительный коэффициент корреляции, когда они одновременно находятся в одном направлении. Если они находятся в противоположных направлениях – то имеется отрицательный коэффициент корреляции. Если коэффициент корреляции равен плюс 1, переменные положительно коррелированы; если это значение равно минус 1, то полностью отрицательно коррелированы.

Коэффициент корреляции определяется

$$R_{(x,y)} = \frac{\sum(x_i - x_{сред}) \cdot (y_i - y_{сред})}{\sum(x_i - x_{сред}) \cdot \sum(y_i - y_{сред})}, \quad (2.6)$$

где  $x_i$  – точки в наборе данных  $x$ ;  $y_i$  – точки в наборе данных  $y$ ;  $x_{сред}$  – среднее значение набора данных  $x$ ;  $y_{сред}$  – среднее значение набора данных  $y$ .

Все расчёты коэффициента корреляции для объектов Пряд-ткац. фабрики, Мех. мастерской и Завода соков, показаны в таблицах 2.4, 2.5, 2.6 и 2.7.

Тогда коэффициент корреляции между нагрузками Пряд-ткац. фабрикой и Мех. мастерской определяется

$$R_{(\text{пряд-ткац.}; \text{мех.})} = \frac{\sum_{i=1}^{24} (S_{\text{пряд-ткац.}i} - S_{\text{пряд-ткац.} \text{сред}})(S_{\text{мех.}i} - S_{\text{мех.} \text{сред}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{24} (S_{\text{пряд-ткац.}i} - S_{\text{пряд-ткац.} \text{сред}}) \cdot \sum_{i=1}^{24} (S_{\text{мех.}i} - S_{\text{мех.} \text{сред}})}} \quad (2.7)$$

Таблица 2.4 – Расчёт коэффициента корреляции между Прядельно-ткацкой фабрикой и Механической мастерской

| $S_{\text{пряд-ткац.}}$ ,<br>кВА | $S_{\text{мех.}}$ ,<br>кВА | $S_{\text{пряд-ткац.}} -$<br>$S_{\text{пряд-ткац.} \text{сред}}$ | $S_{\text{мех.}} -$<br>$S_{\text{мех.} \text{сред}}$ | $(S_{\text{пряд-ткац.}} -$<br>$S_{\text{сред}})^2$ | $(S_{\text{мех.}} -$<br>$S_{\text{сред}})^2$ | $(S_{\text{пряд-ткац.}} -$<br>$S_{\text{сред}}) \times$<br>$(S_{\text{мех.}} - S_{\text{сред}})$ |
|----------------------------------|----------------------------|--|--|--|--|--|
| 9000                             | 150                        | -7104  | -298   | 50466816   | 88804  | 2116992  |
| 9000                             | 150                        | -7104  | -298   | 50466816   | 88804  | 2116992  |
| 9000                             | 150                        | -6604  | -298   | 43612816   | 88804  | 1967992  |
| 9500                             | 150                        | -6104  | -298   | 37258816   | 88804  | 1818992  |
| 10000                            | 150                        | -5604  | -298   | 31404816   | 88804  | 1669992  |
| 13500                            | 150                        | -5104  | -298   | 26050816   | 88804  | 1520992  |
| 19000                            | 800                        | -4604  | 352  | 21196816   | 123904                                       | -1620608   |
| 23000                            | 1100                       | -4104  | 652  | 16842816   | 425104                                       | -2675808   |
| 25000                            | 1100                       | -3604  | 652  | 12988816   | 425104                                       | -2349808   |
| 26000                            | 1100                       | 10396  | 652  | 108076816  | 425104                                       | 6778192  |
| 26500                            | 1100                       | 11396  | 652  | 129868816  | 425104                                       | 7430192  |
| 24000                            | 1100                       | 8896   | 652  | 79138816   | 425104                                       | 5800192  |
| 25000                            | 800                        | 9396   | 352  | 88284816   | 123904                                       | 3307392  |
| 25500                            | 800                        | 10396  | 352  | 108076816  | 123904                                       | 3659392  |
| 25000                            | 600                        | 9896   | 152  | 97930816   | 23104  | 1504192  |
| 23000                            | 150                        | 7396   | -298   | 54700816   | 88804  | -2204008   |
| 20000                            | 150                        | 3896   | -298   | 15178816   | 88804  | -1161008   |
| 18000                            | 150                        | 1896   | -298   | 3594816  | 88804  | -565008  |
| 16000                            | 150                        | 896  | -298   | 802816   | 88804  | -267008  |
| 15000                            | 150                        | -2104  | -298   | 4426816  | 88804  | 626992   |
| 13000                            | 150                        | -4104  | -298   | 16842816   | 88804  | 1222992  |

|   |                                 |                                       |      |          |       |         |
|---|---------------------------------|---------------------------------------|------|----------|-------|---------|
| 11000                                   | 150                             | -5104                                 | -298 | 26050816 | 88804 | 1520992 |
| 10000                                   | 150                             | -6104                                 | -298 | 37258816 | 88804 | 1818992 |
| 8000                                    | 150                             | -7104                                 | -298 | 50466816 | 88804 | 2116992 |
| $S_{\text{пряд-ткац.сред}} = 16104$ кВА | $S_{\text{мех.сред}} = 448$ кВА | $R_{(\text{пряд-ткац.;мех.})} = 0,56$ |      |          |       |         |

Коэффициент корреляции между нагрузками Мех.мастерской и Заводом соков определяется

$$R_{(\text{пряд-ткац.;сок.})} = \frac{\sum_{i=1}^{24} (S_{\text{пряд-ткац.}i} - S_{\text{пряд-ткац.сред}})(S_{\text{сок.}i} - S_{\text{сок.сред}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{24} (S_{\text{пряд-ткац.}i} - S_{\text{пряд-ткац.сред}}) \cdot \sum_{i=1}^{24} (S_{\text{сок.}i} - S_{\text{сок.сред}})}} \quad (2.8)$$

Таблица 2.5 – Расчёт коэффициента корреляции между Прядельно-ткацкой фабрикой и Заводом соков

| $S_{\text{пряд-ткац.}}$<br>кВА | $S_{\text{сок.}}$<br>кВА | $(S_{\text{пряд-ткац.}} - S_{\text{пряд-ткац.сред}})$ | $(S_{\text{сок.}} - S_{\text{сок.сред}})$ | $(S_{\text{пряд-ткац.}} - S_{\text{сред}})^2$ | $(S_{\text{сок.}} - S_{\text{сред}})^2$ | $(S_{\text{пряд-ткац.}} - S_{\text{сред}}) \times (S_{\text{сок.}} - S_{\text{сред}})$ |
|--------------------------------|--------------------------|---|---|---|---|--|
| 9000                           | 200                      | -7104   | -702,1                                    | 50466816                                      | 492944                                  | 4987718  |
| 9000                           | 200                      | -7104   | -702,1                                    | 50466816                                      | 492944                                  | 4987718  |
| 9000                           | 200                      | -6604   | -702,1                                    | 43612816                                      | 492944                                  | 4636668  |
| 9500                           | 200                      | -6104   | -702,1                                    | 37258816                                      | 492944                                  | 4285618  |
| 10000                          | 200                      | -5604   | -702,1                                    | 31404816                                      | 492944                                  | 3934568  |
| 13500                          | 200                      | -5104   | -702,1                                    | 26050816                                      | 492944                                  | 3583518  |
| 19000                          | 200                      | -4604   | -702,1                                    | 21196816                                      | 492944                                  | 3232468  |
| 23000                          | 900                      | -4104   | -2,1                                      | 16842816                                      | 4,5                                     | 8618   |
| 25000                          | 1000                     | -3604   | 97,9                                      | 12988816                                      | 9584                                    | -352831  |
| 26000                          | 1800                     | 10396   | 897,9                                     | 108076816                                     | 806224                                  | 9334568  |
| 26500                          | 1800                     | 11396   | 897,9                                     | 129868816                                     | 806224                                  | 10232468   |
| 24000                          | 1800                     | 8896  | 897,9                                     | 79138816                                      | 806224                                  | 7987718  |
| 25000                          | 1200                     | 9396  | 297,9                                     | 88284816                                      | 88744                                   | 2799068  |
| 25500                          | 1100                     | 10396   | 197,9                                     | 108076816                                     | 39164                                   | 2057368  |

|   |                                   |                                     |        |          |        |          |
|---|-----------------------------------|-------------------------------------|--------|----------|--------|----------|
| 25000                                     | 1100                              | 9896                                | 197,9  | 97930816 | 39164  | 1958418  |
| 23000                                     | 900                               | 7396                                | -2,1   | 54700816 | 4,5    | -15531   |
| 20000                                     | 750                               | 3896                                | -152,1 | 15178816 | 23134  | -592581  |
| 18000                                     | 1000                              | 1896                                | 97,9   | 3594816  | 9584   | 185618   |
| 16000                                     | 1100                              | 896                                 | 197,9  | 802816   | 39164  | 177318   |
| 15000                                     | 1500                              | -2104                               | 597,9  | 4426816  | 357484 | -1257981 |
| 13000                                     | 1500                              | -4104                               | 597,9  | 16842816 | 357484 | -2453781 |
| 11000                                     | 1500                              | -5104                               | 597,9  | 26050816 | 357484 | -3051681 |
| 10000                                     | 800                               | -6104                               | -102,1 | 37258816 | 10424  | 623218,4 |
| 8000                                      | 500                               | -7104                               | -402,1 | 50466816 | 161684 | 2856518  |
| $S_{\text{пряд-ткац.сред}}$<br>=16104 кВА | $S_{\text{сок.сред}}$<br>=902 кВА | $R_{(\text{пряд-ткац;сок})} = 0,69$ |        |          |        |          |

Коэффициент корреляции между нагрузками Пряд-ткац. фабрики и Завода по производству соков определяется

$$R_{(\text{сок;мех})} = \frac{\sum_{i=1}^{24} (S_{\text{сок},i} - S_{\text{сок.сред}})(S_{\text{мех},i} - S_{\text{мех.сред}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{24} (S_{\text{сок},i} - S_{\text{сок.сред}}) \cdot \sum_{i=1}^{24} (S_{\text{мех},i} - S_{\text{мех.сред}})}} \quad (2.9)$$

Таблица 2.6 – Расчёт коэффициента корреляции между Заводом соков и Механической мастерской

| $S_{\text{сок}}$<br>кВА | $S_{\text{мех}}$<br>кВА | $S_{\text{сок}} - S_{\text{сок.сред}}$ | $S_{\text{мех}} - S_{\text{мех.сред}}$ | $(S_{\text{сок}} - S_{\text{сок.сред}})^2$ | $(S_{\text{мех}} - S_{\text{мех.сред}})^2$ | $(S_{\text{сок}} - S_{\text{сок.сред}}) \times (S_{\text{мех}} - S_{\text{мех.сред}})$ |
|-------------------------|-------------------------|--|--|--|--|--|
| 150                     | 200                     | -298                                   | -702,1                                 | 88804                                      | 492944                                     | 209226   |
| 150                     | 200                     | -298                                   | -702,1                                 | 88804                                      | 492944                                     | 209226   |
| 150                     | 200                     | -298                                   | -702,1                                 | 88804                                      | 492944                                     | 209226   |
| 150                     | 200                     | -298                                   | -702,1                                 | 88804                                      | 492944                                     | 209226   |
| 150                     | 200                     | -298                                   | -702,1                                 | 88804                                      | 492944,                                    | 209226   |
| 150                     | 200                     | -298                                   | -702,1                                 | 88804                                      | 492944                                     | 209226   |
| 800                     | 200                     | 352                                    | -702,1                                 | 123904                                     | 492944                                     | -247139  |
| 1100                    | 900                     | 652                                    | -2,1                                   | 425104                                     | 4,5  | -1369  |

Продолжение таблицы 2.6

|                                    |                                    |                                       |        |        |         |         |
|------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|--------|--------|---------|---------|
| 1100                               | 1000                               | 652                                   | 97,9   | 425104 | 9584    | 63831   |
| 1100                               | 1800                               | 652                                   | 897,9  | 425104 | 8062241 | 585431  |
| 1100                               | 1800                               | 652                                   | 897,9  | 425104 | 806224  | 585431  |
| 1100                               | 1800                               | 652                                   | 897,9  | 425104 | 806224  | 585431  |
| 800                                | 1200                               | 352                                   | 297,9  | 123904 | 88744   | 104861  |
| 800                                | 1100                               | 352                                   | 197,9  | 123904 | 39164   | 69661   |
| 600                                | 1100                               | 152                                   | 197,9  | 23104  | 39164   | 30080,8 |
| 150                                | 900                                | -298                                  | -2,1   | 88804  | 4,5     | 626     |
| 150                                | 750                                | -298                                  | -152,1 | 88804  | 23134   | 45326   |
| 150                                | 1000                               | -298                                  | 97,9   | 88804  | 9584,41 | -29175  |
| 150                                | 1100                               | -298                                  | 197,9  | 88804  | 39164   | -58975  |
| 150                                | 1500                               | -298                                  | 597,9  | 88804  | 357484  | -178174 |
| 150                                | 1500                               | -298                                  | 597,9  | 88804  | 357484  | -178174 |
| 150                                | 1500                               | -298                                  | 597,9  | 88804  | 357484  | -178174 |
| 150                                | 800                                | -298                                  | -102,1 | 88804  | 10424   | 30426   |
| 150                                | 500                                | -298                                  | -402,1 | 88804  | 161684  | 119826  |
| $S_{\text{сок.сред}} = 902$<br>кВА | $S_{\text{мех.сред}} = 448$<br>кВА | $R_{(\text{сок}; \text{мех})} = 0,48$ |        |        |         |         |

Таблица 2.7 – Результаты расчётов коэффициентов корреляции мощности нагрузок промышленных электропотребителей

|                    | Пряд-ткац. фабрика | Мех. мастерская | Завод соков |
|--------------------|--------------------|-----------------|-------------|
| Пряд-ткац. фабрика | 1,0                | 0,56            | 0,69        |
| Мех. мастерская    | —————              | 1,0             | 0,48        |
| Завод соков        | —————              | —————           | 1,0         |

Значения коэффициентов корреляции между нагрузками промышленных электропотребителей (таблица 2.7) положительные и равны 0,48 – 0,69, что показывает значительную статистическую взаимосвязь между мощностями нагрузки присоединений.

Для трансформаторов (20 МВА; 33/11 кВ) наблюдается максимум мощности потребляемой нагрузки с 08:00 ч до 10:00 ч ровно 47,2 МВА (рисунок 2.7). Следовательно, перегрузки трансформаторов

$$S_{\text{перегрузка}} = \frac{S_{\text{макс}} - S_{\text{ном}}}{S_{\text{ном}}} \cdot 100 \% = \frac{47,2 - 40}{40} \cdot 100 = 18 \%. \quad (2.10)$$

### 2.1.2. Нагрузки электропотребителей Нового сектора промышленного района города Адра (Сирийская Арабская Республика)

Новый сектор промышленного района г. Адра включает (таблица 2.8) жилые помещения и малоэтажные здания, а также промышленные объекты небольшой мощности, которые питаются от трансформаторов 33/11кВ и 33/0,4 кВ [45].

Таблица 2.8 – Электропотребители Нового сектора промышленного района г.Адра

| №  | Электропотребители                                       | Количество | Единицы            |
|----|--|------------|--------------------|
| 1  | Жилой комплекс, чел.                                     | 164000     | Житель             |
| 2  | Предприятия общепита                                     | 29         | 29 мест            |
| 3  | Магазины продуктовых товаров                             | 224        | 21 м <sup>2</sup>  |
| 4  | Магазины промышленных товаров                            | 154        | 31 м <sup>2</sup>  |
| 5  | Средние школы  | 12         | 495 учеников       |
| 6  | Кинотеатры, кинозалы                                     | 11         | 110 мест           |
| 7  | Салоны парикмахерских                                    | 9          | 4 раб.мест         |
| 8  | Ателье пошива одежды                                     | 8          | 4 раб.мест         |
| 9  | Мастерская ремонта электробытовых приборов, телевизоров. | 10         | 11 раб.мест        |
| 10 | Медицинский факультет государственного университета      | 1          | 98 студентов       |
| 11 | Поликлиника  | 4          | 190 посещений      |
| 12 | Управление администрации района                          | 3          | 250 м <sup>2</sup> |
| 13 | Химчистка и прачечная                                    | 6          | 230 кг.вещей       |
| 14 | Автозаправочная станция (АЗС)                            | 5          |                    |
| 15 | Насосная станция и водоснабжение                         | 6          |                    |

В таблицах 2.9 и 2.10 показаны результаты вычислений значений активных и полных мощностей нагрузок потребителей ЭЭ Нового сектора г. Адра. Тогда значение суммарной активной мощности электропотребителей жилой комплекс для вечернего максимума составляет

$$P_{\text{жил}} = 164000 \text{ чел} \times 0,19 \frac{\text{кВт}}{\text{чел}} = 31160 \text{ кВт}. \quad (2.11)$$

Величина суммарной полной мощности

$$S_{\text{жил}} = \sqrt{31160^2 + \left(\frac{0,4}{0,93} \times 31160\right)^2} = 33920 \text{ кВА}. \quad (2.12)$$

Величина суммарной реактивной мощности нагрузки вечернего максимума составляет

$$Q_{\text{жил}} = \sqrt{(33920^2 - 31160^2)} = 13402 \text{ кВАр}. \quad (2.13)$$

Определена величина суммарной активной мощности нагрузки Нового сектора без жилого комплекса электропотребителей утреннего максимума

$$P_{\text{без}} = 756 + 939 + 571 + \dots + 481 = 4895 \text{ кВт}. \quad (2.14)$$

Величина суммарной полной мощности нагрузки утреннего максимума

$$S_{\text{без}} = 802 + 1236 + 633 + \dots + 661 = 5907 \text{ кВт}. \quad (2.15)$$

В расчётах значение коэффициента активной мощности нагрузок Нового сектора без жилого комплекса электропотребителей утреннего максимума

$$\cos\varphi_{\text{без}} = \frac{4895}{5907} = 0,83. \quad (2.16)$$

Значение коэффициента реактивной мощности Нового сектора без жилого комплекса электропотребителей утреннего максимума

$$\operatorname{tg}\varphi_{\text{без}} = \frac{\sqrt{5907^2 - 4895^2}}{4895} = 0,67. \quad (2.17)$$

Установлено значение суммарной реактивной мощности нагрузки Нового сектора без жилого комплекса электропотребителей утреннего максимума

$$Q_{\text{без}} = \sqrt{5907^2 - 4895^2} = 3306 \text{ кВАр}. \quad (2.18)$$

Таблица 2.9 – Значения расчётной активной мощности нагрузок  
электропотребителей Нового сектора г. Адра

| №  | Электропотребители                                      | Единицы             | Значение удельной нагрузки | $P_{расчётная}$ , кВт |
|----|---|---------------------|----------------------------|-----------------------|
| 1  | Жилой комплекс  | 164000 жителей      | 0,19 кВт/чел               | 31161                 |
| 2  | Предприятия общепита                                    | 840 мест            | 0,91 кВт/мест              | 756                   |
| 3  | Магазины продуктовых товаров                            | 4703 м <sup>2</sup> | 0,2 кВт/м <sup>2</sup>     | 939                   |
| 4  | Магазины промышленных товаров                           | 4773 м <sup>2</sup> | 0,12 кВт/м <sup>2</sup>    | 571                   |
| 5  | Средние школы   | 5940 учащихся       | 0,15 кВт/учащихся          | 891                   |
| 6  | Кинотеатры, кинозалы                                    | 1209 мест           | 0,12 кВт/мест              | 145                   |
| 7  | Салоны парикмахерских                                   | 36 раб.мест         | 1,31 кВт/раб.мест          | 48                    |
| 8  | Ателье пошива одежды                                    | 48 раб.мест         | 1,5кВт/раб.мест            | 73                    |
| 9  | Мастерская ремонта электробытовых приборов, телевизоров | 110 раб.мест        | 4,52 кВт/раб.мест          | 497                   |
| 10 | Медицинский факультет государственного университета     | 98 студентов        | 0,43 кВт/студента          | 38                    |
| 11 | Поликлиника   | 760 посещений       | 0,15 кВт/посещений         | 113                   |
| 12 | Управление администрации района                         | 750 м <sup>2</sup>  | 0,32 кВт/м <sup>2</sup>    | 226                   |
| 13 | Химчистка и прачечная                                   | 1380 кг.вещей       | 0,066 кВт/кг               | 93                    |
| 14 | Автозаправочная станция (АЗС)                           | 5                   |                            | 26                    |
| 15 | Насосная станция и водоснабжение                        | 6                   |                            | 481                   |

Таблица 2.10 – Значения полной мощности нагрузки электропотребителей Нового сектора г. Адра

| № | Электропотребители            | $P$ , кВт | $\cos\varphi / \operatorname{tg}\varphi$ | $S$ , кВА |
|---|-------------------------------|-----------|--|-----------|
| 1 | Жилой комплекс                | 31161     | 0,92/0,41                                | 33920     |
| 2 | Предприятия общепита          | 755       | 0,96/0,32                                | 802       |
| 3 | Магазины продуктовых товаров  | 939       | 0,81/0,72                                | 1236      |
| 4 | Магазины промышленных товаров | 571       | 0,91/0,43                                | 633       |
| 5 | Средние школы                 | 891       | 0,92/0,45                                | 989       |
| 6 | Кинотеатры, кинозалы          | 145       | 0,96/0,32                                | 153       |

|    |  |        |           |       |
|----|--|--------|-----------|-------|
| 7  | Салоны парикмахерских                                    | 48     | 0,96/0,25 | 49    |
| 8  | Ателье пошива одежды                                     | 73     | 0,92/0,51 | 81    |
| 9  | Мастерская ремонта электробытовых приборов, телевизоров. | 497    | 0,81/0,86 | 723   |
| 10 | Медицинский факультет государственного университета      | 38     | 0,86/0,65 | 53    |
| 11 | Поликлиника  | 113    | 0,97/0,24 | 120   |
| 12 | Управление администрации района                          | 226    | 0,91/0,49 | 254   |
| 13 | Химчистка и прачечная                                    | 93     | 0,81/0,76 | 126   |
| 14 | Автозаправочная станция (АЗС)                            | 26     | 0,82/0,76 | 3334  |
| 15 | Насосная станция и водоснабжение                         | 481    | 0,81/0,76 | 661   |
|    | Суммарное значение.                                      | 36 055 |           | 39827 |

Определим полную расчётную максимальную мощность потребителей комплекса Нового сектора (г. Адра) с коэффициентом учета одновременности максимумов нагрузки ( $K_{одн}=0,86$ ).

$$S_{\text{расчет}} = 39827 \times 0,86 = 34250 \text{кВА}. \quad (2.19)$$

Таким образом, установлено, что величины расчётной полной мощности потребителей Нового сектора 34,25 МВА и экспериментально полученной максимальной полной мощности, равной 33,92 МВА, практически, совпали. На рисунке 2.8 показан график полной мощности нагрузки электропотребителей Нового сектора г. Адра.

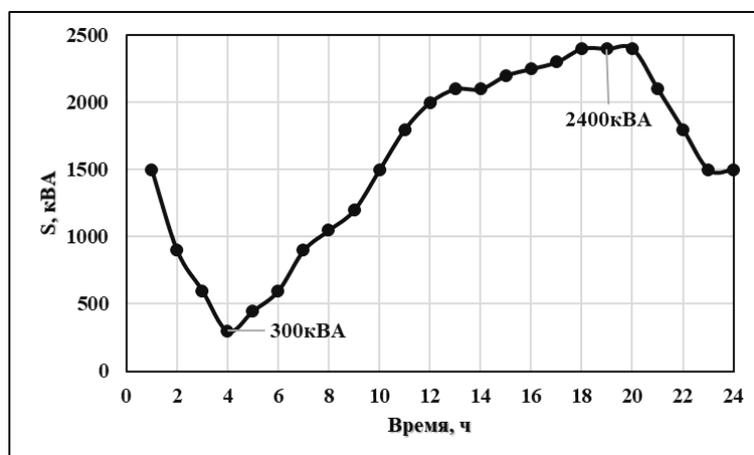


Рисунок 2.8 – Изменения суточной полной мощности нагрузки электропотребителей Нового сектора г. Адра

Установлено, что график полной мощности нагрузки электропотребителей Нового сектора г.Адра содержит максимумы: вечерний с 17:00 до 20:00 около 2,4 МВА; снижение нагрузки до 0,3 МВА наблюдается с 23:00 до 08:00.

## 2.2. Исследование основных факторов, определяющих срок службы трансформаторов, на примере подстанции «Кабун-1»

### 2.2.1. Виды условий охлаждающей среды для трансформаторов

Допускаемые систематические перегрузки трансформаторов определяются в зависимости от характеристик графика нагрузки и эквивалентных годовых температур окружающей среды [49, 50]. Также учитывается длительность систематической перегрузки (Таблица 2.11)

1. Коэффициент начальной загрузки  $k_{эз}$ , равный

$$k_{эз} = \frac{I_{эф}}{I_{ном.т}}. \quad (2.20)$$

где  $I_{эф}$  – отношение эффективной токовой нагрузки;  $I_{ном.т}$  – номинальный ток трансформатора.

2. Коэффициент систематической перегрузки трансформатора  $k_{сп}$  определяется коэффициентом начальной загрузки  $k_{эз}$  и длительностью систематической перегрузки трансформатора  $t_{сп} = (1,0; 2,0; 4,0; 6,0)$  ч,

$$\begin{aligned} k_{сп} &= f(k_{эз}, t_{сп}); \\ k_{сп} &= [1,1 \dots 1,5]. \end{aligned} \quad (2.21)$$

3. Коэффициент аварийной перегрузки  $k_{ап}$ . В аварийных случаях  $k_{ап}$  зависит от коэффициента начальной загрузки  $k_{эз}$  и длительности аварийной перегрузки  $t_{ап}$  для трансформаторов с разными системами охлаждения [51].

$$k_{ап} = f(k_{эз}, t_{ап}). \quad (2.22)$$

Для масляных и совтоловых трансформаторов, при коэффициенте начальной загрузки, меньшем, 0,93 и при типе охлаждения (М, Д) перегрузка может достигать 60 % в течение 30 мин, а если тип охлаждения (ДЦ, Ц), тогда перегрузка может достигать 70 %. В течение 6 часов перегрузка токов может достигать 40 % за 5 суток [52-54].

Таблица 2.11 – Значения длительности интервалов и допустимых перегрузок сухих трансформаторов

|  |     |     |     |     |     |
|--|-----|-----|-----|-----|-----|
| Значение коэффициента аварийных перегрузок( $\kappa_{ан}$ )    | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,5 | 1,6 |
| Длительность интервалов аварийных перегрузок ( $t_{ан}$ ), мин | 60  | 45  | 32  | 18  | 5   |

### 2.2.2. Значения допустимой температуры масла и температуры обмоток исследуемых трансформаторов

На ПС «Кабун-1» установлены 2 трансформатора с  $S_{ном}=20$  МВА; 33/11 кВ и 2 трансформатора с  $S_{ном}=10$  МВА; 33/0,4 кВ, от которых питаются промышленные и городские объекты г. Адра. В таблице 2.12 приведены паспортные данные исследуемых трансформаторов [55].

Таблица 2.12 – Основные характеристики трансформатора 33/11 кВ

|                     |                          |
|---------------------|--------------------------|
| Тип (Марка)         | УТЕС (Саудовская Аравия) |
| Серийный №          | 5-04-005-01-268          |
| Охлаждение          | ONAN                     |
| Тип охлаждения      | Д                        |
| Фаз                 | 3                        |
| Частота             | 50 Гц                    |
| $S_{ном}$           | 20 000 кВА               |
| В.Н                 | 33 кВ                    |
| Н.Н                 | 11 кВ                    |
| $Z_T$               | 10 %                     |
| Класс изоляции      | A                        |
| $P_{кз}$            | 19140 кВт                |
| $\Delta P_{x.x}$    | 900 кВт                  |
| $\theta_{обм.макс}$ | 98,5 °С                  |
| $\theta_{обм.сред}$ | 85,5 °С                  |

Исследуем температурные режимы нагрева отдельных элементов конструкции трансформаторов. Значение температуры нагрева конструктивного

элемента трансформатора  $\theta$  определяется по сумме потерь в этом элементе и температуре окружающей среды  $\theta_{o.c}$  (температура воздуха) [55-58].

Превышение температуры элемента трансформатора  $\theta_{n.p}$  определяется по выражению

$$\theta_{np} = \theta - \theta_{o.c}. \quad (2.23)$$

Значения допустимых температур масла и обмоток трансформаторов 33/11 кВ и максимальные значения перегрева при  $K_{зг}=1$  показаны в таблице 2.13 [55, 59, 60].

Таблица 2.13 – Сравнение максимальных значений перегрева масла и обмоток при  $K_{зг}=1$  трансформаторов 33/11 кВ со значениями допустимого перегрева

| Параметр (°C)  | Обозначение                             | Доп. | Макс. |
|--|---|------|-------|
| Значение температуры среднего перегрева обмотки сверх температуры масла                                  | $\theta_{обм.сред.м}$                   | 22   | 32    |
| Значение температуры среднего перегрева обмотки сверх температуры охлаждающего воздуха                   | $\theta_{обм.сред}$                     | 66   | 40    |
| Значение температуры среднего перегрева масла сверх температуры охлаждающего воздуха                     | $\theta_{м.сред}$                       | 44   | 38    |
| Значение температуры перегрева наиболее нагретой точки масла сверх температуры охлаждающего воздуха      | $\theta_{м.макс}$                       | 56   | 42    |
| Значение температуры наиболее нагретой точки обмотки над значение температуры среднего перегрева обмотки | $\theta_{обм.макс} - \theta_{обм.сред}$ | 12   | 12    |
| Значение температуры перегрева наиболее нагретой точки обмотки сверх температуры охлаждающего воздуха    | $\theta_{обм.макс}$                     | 78   | 52    |

Для исследования функциональных зависимостей параметров, установления связей между переменными и построения моделей аппроксимации используется коэффициент детерминации. Коэффициент детерминации ( $R^2$ ) – это мера, которая представляет информацию об адекватности модели [61-63].

Если значение коэффициента приближается к единице, то наблюдается взаимозависимость переменных. В качестве независимой переменной рассматривается значение температуры перегрева элемента конструкции трансформатора ( $y = \theta_{сред}$ ) а в качестве зависимой переменной – коэффициент загрузки трансформатора ( $x = K_{зг}$ ). Коэффициент  $R^2$  вычисляется по уравнению

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (y_i - \hat{y})^2}{\sum_i (y_i - \bar{y})^2}, \quad (2.24)$$

где  $y_i$  – фактические значения, полученные в результате расчета;  $\hat{y}$  – расчетные значения, полученные с использованием разработанной модели;  $\bar{y} = \sum_i \frac{y_i^2}{n}$  – средняя исследуемая величина;  $\sum_i (y_i - \hat{y})^2$  – значение суммы квадратов ошибок уравнения регрессии;  $\sum_i (y_i - \bar{y})^2$  – значение суммы квадратов отклонений расчетных точек от среднего значения.

Средняя ошибка аппроксимации [64, 65] вычисляется по выражению

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \left| \frac{y_i - \hat{y}}{y_i} \right|, \quad (2.25)$$

где  $n$  – количество фактических значений.

Определены модели аппроксимирующих функций температуры установившегося перегрева, зависящих от коэффициентов загрузки трансформаторов для значений  $(\theta_{\text{обм.сред.м}}; \theta_{\text{м.сред}}; \theta_{\text{м}}; \theta_{\text{обм.макс}})^\circ\text{C}$ .

При этом возможные модели аппроксимирующих функций  $(\theta_{\text{обм.сред.м}}; \theta_{\text{м.сред}}; \theta_{\text{м}}; \theta_{\text{обм.макс}})$ , представим следующими выражениями:

$$\text{Экспоненциальная} \quad t_1 = 2,8 e^{1,9K_{\text{зг}}}. \quad (2.26)$$

$$\text{Линейная} \quad t_1 = 41,2K_{\text{зг}} - 85,5. \quad (2.27)$$

$$\text{Полиномиальная} \quad t_1 = 17,5K_{\text{зг}}^2 + 6,1K_{\text{зг}} + 2. \quad (2.28)$$

Вычислим коэффициент детерминации по выражению (2.24) для полиномиальной функции. Расчетные значения

$$t_i = \left\{ \begin{array}{l} \theta_{\text{обм.сред.м}} = (1; 5; 8; 10; 20; 25; 35; 45; 55; 70; 85)^\circ\text{C} \\ \theta_{\text{м.сред}} = (1; 7; 10; 20; 30; 45; 60; 80; 100; 120; 150)^\circ\text{C} \\ \theta_{\text{м}} = (1; 8; 13; 25; 40; 55; 75; 105; 130; 160; 180)^\circ\text{C} \\ \theta_{\text{обм.макс}} = (1; 13; 30; 45; 60; 90; 120; 150; 180; 220; 249)^\circ\text{C} \end{array} \right\}. \quad (2.29)$$

Расчётные значения, полученные с помощью (2.28):

$$\begin{aligned} t_1 &= 17,5K_{\text{зг}}^2 + 6,1K_{\text{зг}} + 2; \\ K_{\text{зг}} = 0 &\Rightarrow \hat{t}_1 = 17,5(0)^2 + 6,1(0) + 2 = 2^\circ\text{C}; \\ K_{\text{зг}} = 0,2 &\Rightarrow \hat{t}_2 = 17,5(0,2)^2 + 6,1(0,2) + 2 = 3,9^\circ\text{C}. \end{aligned} \quad (2.30)$$

Среднее значение:

$$\bar{t} = \frac{\sum_i t_i}{n} = \frac{1+5+8+10+20+25+35+45+55+70+85}{11} = 32,6^\circ\text{C}. \quad (2.31)$$

Подставим (2.29), (2.30), (2.31) в (2.24):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i(t_i - \hat{t})}{(t_i - \bar{t})} = 1 - \frac{(1-2)^2 + \dots + (85-84,3)^2}{(1-32,6)^2 + \dots + (85-32,6)^2} = 0,998. \quad (2.32)$$

Чем ближе значение коэффициента  $R^2$  к 1, тем существеннее взаимозависимость переменных. Далее вычислим среднюю ошибку аппроксимации, подставляя (2.29) и (2.30) в (2.25):

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum_i \left| \frac{(t_i - \hat{t})}{t_i} \right| = \left| \frac{1}{11} \left( \frac{1+2}{1} \right) + \dots + \left( \frac{85-84,3}{85} \right) \right| \cdot 100 \% = 7,2. \quad (2.33)$$

Погрешность составила менее 10 %, что показывает высокую достоверность функции аппроксимации. Результаты расчетов приведены в таблице 2.14.

Таблица 2.14 – Результаты расчета коэффициента детерминации для полиномиальной функции

| $K_{зг}$ | $t_i$ | $\hat{t}$ | $\bar{t}$ | $(t_i - \hat{t})^2$ | $(t_i - \bar{t})^2$ | $\sum_i (t_i - \hat{t})^2$ | $\sum_i (t_i - \bar{t})^2$ | $R^2$ | $\bar{A} \%$ |
|----------|-------|-----------|-----------|---------------------|---------------------|----------------------------|----------------------------|-------|--------------|
| 0        | 1     | 2         | 32,7      | 0,96                | 1000,8              | 14,1                       | 7900                       | 0,998 | 7,2          |
| 0,2      | 5     | 3,92      |           | 1,21                | 763,7               |                            |                            |       |              |
| 0,4      | 8     | 7,31      |           | 0,60                | 606,9               |                            |                            |       |              |
| 0,6      | 10    | 12,03     |           | 3,82                | 512,4               |                            |                            |       |              |
| 0,8      | 20    | 18,08     |           | 3,67                | 159,6               |                            |                            |       |              |
| 1        | 25    | 25,72     |           | 0,39                | 58,3                |                            |                            |       |              |
| 1,2      | 35    | 34,66     |           | 0,19                | 5,59                |                            |                            |       |              |
| 1,4      | 45    | 44,91     |           | 0,01                | 152,8               |                            |                            |       |              |
| 1,6      | 55    | 56,73     |           | 2,71                | 500,1               |                            |                            |       |              |
| 1,8      | 70    | 69,81     |           | 0,04                | 1396                |                            |                            |       |              |
| 2        | 85    | 84,34     |           | 0,43                | 2742,0              |                            |                            |       |              |

В таблице 2.15 приведены уравнения аппроксимации функциональных параметров температуры  $(\theta_{обм.сред.м}; \theta_{м.сред}; \theta_{м}; \theta_{обм.макс})^{\circ}\text{C}$ .

Таблица 2.15 – Уравнения аппроксимации функциональных зависимостей температуры установившегося перегрева элементов трансформатора от его коэффициентов загрузки

| Модели аппроксимирующих функций                |   | $R^2$ | $\bar{A} \%$ |
|--|---|-------|--------------|
| $\theta_{\text{обм.сред.м}}(^{\circ}\text{C})$ |   |       |              |
| Экспоненциальная                               | $\theta_{\text{обм.сред.м}} = 2,8 e^{1,9K_{\text{зг}}}$                   | 0,711 | 9,97 %       |
| Линейная                                       | $\theta_{\text{обм.сред.м}} = 41,2K_{\text{зг}} - 85,5$                   | 0,945 | 85,16 %      |
| Полиномиальная                                 | $\theta_{\text{обм.сред.м}} = 17,5K_{\text{зг}}^2 + 6,1K_{\text{зг}} + 2$ | 0,998 | 7,2 %        |
| $\theta_{\text{м.сред}}(^{\circ}\text{C})$     |   |       |              |
| Экспоненциальная                               | $\theta_{\text{м.сред}} = 3,6 e^{2,1K_{\text{зг}}}$                       | 0,50  | 16,61 %      |
| Линейная                                       | $\theta_{\text{м.сред}} = 73,5K_{\text{зг}} - 16,9$                       | 0,947 | 161,8 %      |
| Полиномиальная                                 | $\theta_{\text{м.сред}} = 30,8K_{\text{зг}}^2 + 11,9K_{\text{зг}} + 1,6$  | 0,999 | 4,49 %       |
| $\theta_{\text{м}}(^{\circ}\text{C})$          |   |       |              |
| Экспоненциальная                               | $\theta_{\text{м}} = 4,1 e^{2,2K_{\text{зг}}}$                            | 0,292 | 21,41 %      |
| Линейная                                       | $\theta_{\text{м}} = 94,5K_{\text{зг}} - 21,6$                            | 0,952 | 205 %        |
| Полиномиальная                                 | $\theta_{\text{м}} = 35,4K_{\text{зг}}^2 + 22,3K_{\text{зг}} + 0,1$       | 0,993 | 13,84 %      |
| $\theta_{\text{обм.макс}}(^{\circ}\text{C})$   |   |       |              |
| Экспоненциальная                               | $\theta_{\text{обм.макс}} = 6,4 e^{2,2K_{\text{зг}}}$                     | 0,127 | 41,49 %      |
| Линейная                                       | $\theta_{\text{обм.макс}} = 129K_{\text{зг}} - 23$                        | 0,968 | 218 %        |
| Полиномиальная                                 | $\theta_{\text{обм.макс}} = 36,4K_{\text{зг}}^2 + 54K_{\text{зг}} + 0,4$  | 0,999 | 6,3 %        |

По данным таблицы 2.15 установлено, что при исследовании степенной, линейной и экспоненциальной функций аппроксимации и оценке их коэффициентов детерминации ( $R^2$ ) наибольшее значение,  $R^2=0,998$ , и наименьшее значение средней ошибки аппроксимации ( $\bar{A}=7,2$ ) характерно для полиномиальной функции, которая является наиболее точной для параметров температуры [55].

На рисунке 2.9 представлены графики изменения температуры перегрева обмоток и масла трансформаторов 33/11 кВ ПС «Кабун-1» в зависимости от среднего коэффициента загрузки  $K_{\text{зг.сред}}$  и аппроксимирующие функции

$$\begin{aligned}
 \theta_{\text{обм.сред.м}} &= 17,5K_{3Г}^2 + 6,1K_{3Г} + 2; \\
 \theta_{\text{м.сред}} &= 30,8K_{3Г}^2 + 11,9K_{3Г} + 1,6; \\
 \theta_{\text{м}} &= 35,4K_{3Г}^2 + 22,3K_{3Г} + 0,1; \\
 \theta_{\text{обм.макс}} &= 36,4K_{3Г}^2 + 54K_{3Г} + 0,4.
 \end{aligned}
 \tag{2.34}$$

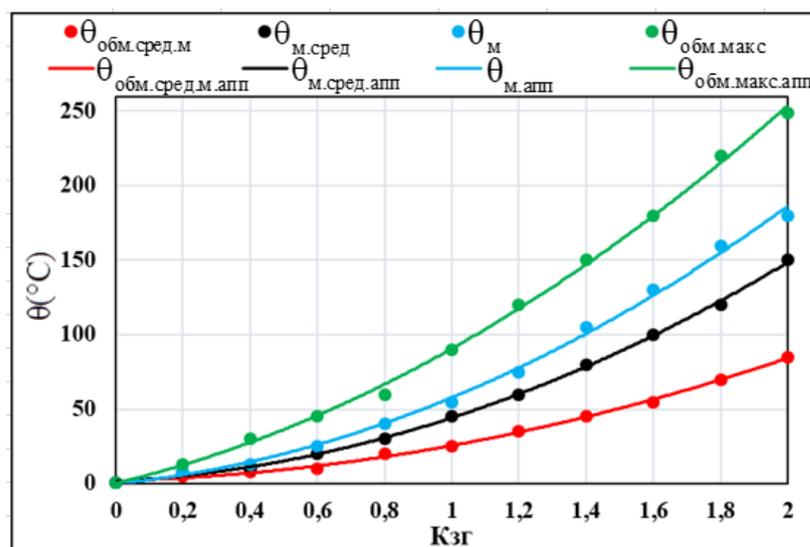


Рисунок 2.9 – Графики температурных параметров и аппроксимирующих функций трансформаторов 33/11 кВ ПС «Кабун-1» (функции перегрева масла и обмотки)

### 2.2.3. Анализ влияния значений температуры окружающей среды на выбор номинальной мощности трансформаторов

Номинальной мощностью является расчётная максимальная мощность, которой трансформаторы могут нагружаться в течение полного срока эксплуатации при изменении температуры окружающей среды. При нагрузочных режимах трансформаторов нагреваются элементы конструкции стали, изоляция обмоток сердечника, медь обмоток и так далее. Элементы металлических частей длительное время могут выдерживать высокие температуры нагревания. Элементы изоляционных материалов при нагревании стареют, что характеризуется снижением механической прочности и увеличением хрупкости.

При этом такие элементы изоляции имеют низкую электрическую прочность, длительность времени полного износа изоляции определяется температурой нагревания – чем она выше, тем меньше время полного износа. Тепловые режимы

эксплуатации обмоток определяются тепловыми процессами, определяющими срок службы. Состояние изоляции и процессы её старения определяются температурой наиболее нагретой точки обмотки  $\theta_{обм.макс}$ . По данному значению температуры и требовалось бы проводить расчёты для определения старения изоляции. Однако, данные расчёты относительно сложные, поэтому для их упрощения используют среднюю температуру обмотки  $\theta_{обм.сред}$  для учёта различия между  $\theta_{обм.макс}$  и  $\theta_{обм.сред}$ .

Считаем, что режим эксплуатации задаётся и является постоянным. Тогда количество выделяющейся в обмотке теплоты, а следовательно, величина среднего перегрева обмотки  $\theta_{обм.сред}$  остаётся постоянной. Однако, значение температуры обмотки изменяется соответственно изменению температуры воздуха в зависимости от времени суток и времени года для масляных трансформаторов, установленных в регионах (Адра, Мост Багдада, Дума центр, Хараста) с температурой воздуха  $35^{\circ}\text{C}$ , состояние полного износа изоляции (при номинальном превышении температуры обмотки, равном  $65^{\circ}\text{C}$ ) достигает за 16 – 20 лет. Срок эксплуатации в 16–20 лет является естественным сроком службы для трансформаторов, установленных в центральной полосе России, работающих непрерывно с полной нагрузкой. Диапазон времени естественного износа изоляции зависит от значения среднегодовой температуры региона установки трансформатора [66].

При этом, нормативного времени износа изоляции обмотки и нормативного срока службы можно добиться и при установке трансформаторов в регионе с повышенной температурой, например, в САР. Тогда трансформатор должен быть загружен мощностью, меньше допустимой – для температуры воздуха  $35^{\circ}\text{C}$ . Значение  $S_{ном}$  не является постоянным, так как зависит от максимальной температуры воздуха региона, где он установлен [45, 55]. Номинальную мощность трансформатора для температуры воздуха, отличной от  $+35^{\circ}\text{C}$ ,  $S_{ном,\theta}$  можно определить по выражению

$$S_{\text{ном.}\theta} = S_{\text{ном}} \left[ 1 - \frac{2(\theta_{\text{о.с.макс}} - 35)}{100} \right]; \quad (2.35)$$

$$\theta_{\text{о.с.макс}} = 55 \text{ } ^\circ\text{C} \Rightarrow \theta_{\text{о.с.макс}} = 0,6S_{\text{ном}}.$$

Таким образом, мощность трансформатора, установленного в САР, уменьшается на 40% по сравнению с РФ – для условий температуры воздуха +35°C, поэтому данный фактор требуется учитывать при эксплуатации трансформаторов в условиях г. Адра [55].

#### 2.2.4. Оценка температуры нагрева обмоток трансформаторов 33/11кВ подстанции «Кабун-1» в зависимости от коэффициентов загрузки

Определим перегрев обмотки и масла трансформатора при изменении нагрузки

$$\theta_{\text{кон}}(t) = \theta_{\text{нач}} \cdot e^{-\left(\frac{t}{T_0}\right)} + \theta_{\text{кон}} \cdot \left[ 1 - e^{-\left(\frac{t}{T_0}\right)} \right], \quad (2.36)$$

где  $\theta_{\text{кон}}(t)$  – значение перегрева элемента конструкции трансформатора в момент времени  $t$ ;  $\theta_{\text{нач}}$  – значение перегрева элемента конструкции трансформатора для  $t = 0$ , определяется нагрузкой трансформатора за предыдущий интервал времени [65, 66] (в нашем исследовании установлено, что  $\theta_{\text{нач}} = 30 \text{ } ^\circ\text{C}$ );  $\theta_{\text{кон}}$  – значение конечного перегрева, установившегося за время  $3T_0$  при постоянной нагрузке;  $T_0$  – значение постоянной времени нагрева [67, 68], которое определяется по таблице 2.16.

Таблица 2.16 – Величины постоянной времени нагрева трансформаторов в зависимости от номинальной мощности и вида охлаждения

| $S_{\text{ном}}$ , кВА | Вид охлаждения | $T_0$ , час |
|------------------------|----------------|-------------|
| До 630                 | М              | 2,50        |
| 1000 – 6300            | М              | 3,50        |
| 10000 – 32000          | Д              | 2,50        |
| 40000 – 63000          | Д              | 3,50        |
| 100000 – 125000        | ДЦ             | 2,50        |

В представленном исследовании значение постоянной времени нагрева трансформатора 20 МВА, установленного на ПС «Кабун-1», принимаем, равным

$T_0=2,5$ ч. Для климатической зоны САР значение эквивалентной годовой температуры  $\theta_{о.с.экв}=28$  °С. Определим значение установившейся средней температуры нагрева обмотки

$$t_{обм.сред} = \theta_{о.с.экв} + \theta_{обм.сред}. \quad (2.37)$$

Значение перегрева обмотки относительно воздуха

$$\theta_{обм.сред} = \theta_{обм.сред.м} + \theta_{м.сред}. \quad (2.38)$$

По данным таблицы 2.15, значение температуры среднего перегрева обмотки сверх температуры масла

$$\theta_{обм.сред.м} = 17,5K_{зг}^2 + 6,1K_{зг} + 2. \quad (2.39)$$

Значение температуры среднего перегрева масла сверх температуры охлаждающего воздуха

$$\theta_{м.сред} = 30,8K_{зг}^2 + 11,9K_{зг} + 1,6. \quad (2.40)$$

С помощью (2.34), выражения (2.37) и (2.38) примут вид

$$\theta_{обм.сред.м}(t) = \theta_{нач} \cdot e^{-\left(\frac{t}{T_0}\right)} + (17,5K_{зг}^2 + 6,1K_{зг} + 2) \left(1 - e^{-\left(\frac{t}{T_0}\right)}\right). \quad (2.41)$$

$$\theta_{м.сред}(t) = \theta_{нач} \cdot e^{-\left(\frac{t}{T_0}\right)} + (30,8K_{зг}^2 + 11,9K_{зг} + 1,6) \left(1 - e^{-\left(\frac{t}{T_0}\right)}\right). \quad (2.42)$$

Подставим (2.41) и (2.42) в (2.38)

$$\begin{aligned} \theta_{обм.сред}(t) &= \theta_{обм.сред.м}(t) + \theta_{обм.сред}(t); \\ \theta_{обм.сред}(t) &= 2 \theta_{нач} \cdot e^{-\left(\frac{t}{T_0}\right)} + (48,3K_{зг}^2 + 18K_{зг} + 3,6) \left(1 - e^{-\left(\frac{t}{T_0}\right)}\right). \end{aligned} \quad (2.43)$$

С помощью выражения (2.37) и, принимая во внимание следующие условия:

1. длительность значения нагрузки в интервале ( $t=1$  ч);
2. значение постоянной времени нагрева ( $T_{нач} = T_0 = 2,5$ ч);
3. значение перегрева элемента конструкции трансформатора для  $t = 0$  ( $\theta_{нач}=30$ °С);
4. значение эквивалентной годовой температуры для климата САР ( $\theta_{о.с.экв}=28$  °С) получаем температуру нагревания обмотки в конце периода  $t$ :

$$t_{обм.сред}(t) = \theta_{о.с.экв} + 60 e^{-\left(\frac{t}{2,5}\right)} + (48,3K_{зг}^2 + 18K_{зг} + 2,6) \left(1 - e^{-\left(\frac{t}{2,5}\right)}\right). \quad (2.44)$$

Подставим (2.44) в (2.41) и (2.42)

$$\theta_{\text{обм.сред.м}}(t = 1\text{ч}) = 30 e^{-\left(\frac{1}{2,5}\right)} + (17,5K_{3Г}^2 + 6,1K_{3Г} + 2) \left(1 - e^{-\left(\frac{1}{2,5}\right)}\right); \quad (2.45)$$

$$\theta_{\text{обм.сред.м}}(t = 1\text{ч}) = 5,8K_{3Г}^2 + 2K_{3Г} + 31,7.$$

$$\theta_{\text{м.сред}}(t = 1\text{ч}) = 30 e^{-\left(\frac{1}{2,5}\right)} + (30,8K_{3Г}^2 + 11,9K_{3Г} + 1,6) \left(1 - e^{-\left(\frac{1}{2,5}\right)}\right); \quad (2.46)$$

$$\theta_{\text{м.сред}}(t = 1\text{ч}) = 5,9K_{3Г}^2 + 2K_{3Г} + 20.$$

Подставляем (2.45) и (2.46) в (2.43)

$$\theta_{\text{обм.сред}}(t = 1\text{ч}) = \theta_{\text{обм.сред.м}}(t = 1\text{ч}) + \theta_{\text{м.сред}}(t = 1\text{ч}); \quad (2.47)$$

$$\theta_{\text{обм.сред}}(t = 1\text{ч}) = 11,7K_{3Г}^2 + 4K_{3Г} + 51,7.$$

Значение температуры нагрева обмотки в конце часа ( $\theta_{\text{о.с.экв}} = 28 \text{ }^\circ\text{C}$ )

$$t_{\text{обм.сред}} = 11,7K_{3Г}^2 + 4K_{3Г} + 79,7. \quad (2.48)$$

На рисунке 2.10 показана графическая зависимость среднего значения установившейся температуры нагрева обмотки ( $t_{\text{обм.сред}}$ )  $^\circ\text{C}$  от значения коэффициентов загрузки трансформаторов 33/11 ПС «Кабун-1».

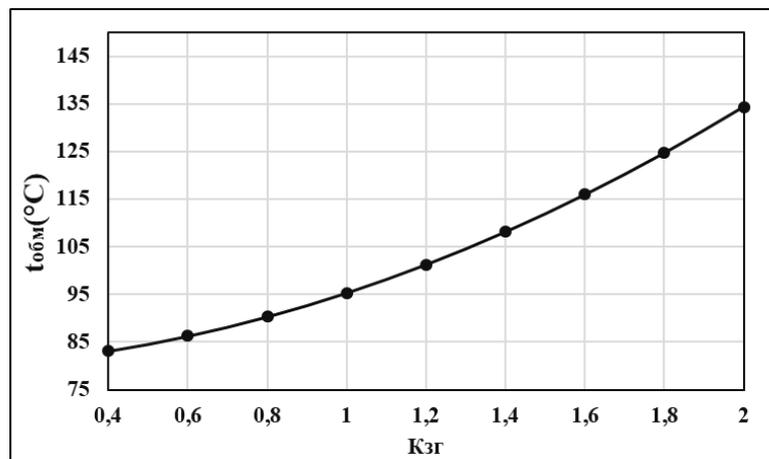


Рисунок 2.10 – Изменение температуры нагрева обмотки в зависимости от коэффициентов загрузки трансформаторов 33/11 кВ ПС «Кабун-1»

С помощью выражения (2.48) получим данные таблицы 2.17.

Таблица 2.17 – Расчетные значения температуры нагревания обмотки

| $K_{3Г}$              | 0    | 0,2  | 0,4  | 0,6  | 0,8  | 1    | 1,2   | 1,4   | 1,6 | 1,8   | 2     |
|-----------------------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-----|-------|-------|
| $t_{\text{обм.сред}}$ | 79,7 | 80,9 | 83,1 | 86,3 | 90,3 | 95,3 | 101,3 | 108,2 | 116 | 124,8 | 134,5 |

Рисунок 2.10 показывает, что:

1. Величина номинального значения температуры средней по сопротивлению температуры обмотки трансформатора  $t_{обм.сред}=85^{\circ}\text{C}$ , следовательно при  $K_{32} \geq 0,6$  имеется повышение температуры конечного нагрева больше допустимой.

2. Конечный перегрев обмотки трансформатора будет иметь место, когда мощность соответствующей нагрузки потребляется на интервале времени  $t > 3T_0$ , при этом длительность временного интервала составляет  $t \geq 3 \times 2,5 = 7,5$  ч.

3. При продолжительности времени  $t < 3T_0$  реальной нагрузки величина перегрева обмотки трансформатора в конце рассматриваемого интервала меньше установившегося значения.

### 2.2.5. Оценка температуры нагрева обмоток трансформаторов 33/11 кВ подстанции «Кабун-1» в зависимости от фактических суточных мощностей нагрузки

На рисунке 2.11 показаны графические зависимости значения перегревов элементов конструкции трансформаторов 33/11 кВ ПС «Кабун-1».

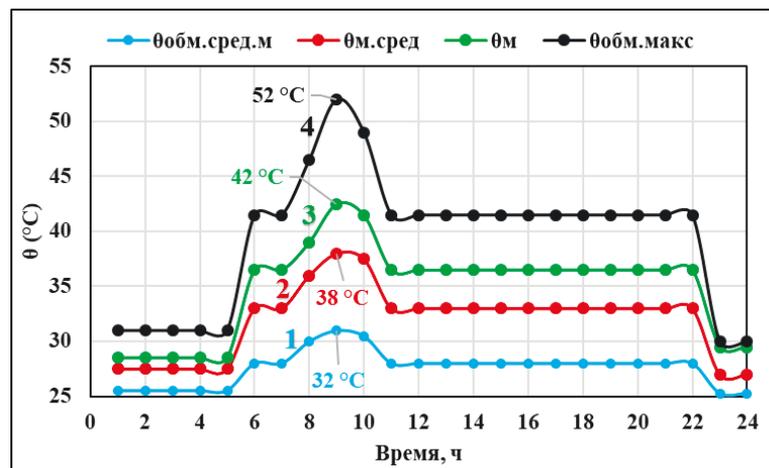


Рисунок 2.11 – Графические зависимости значения перегревов элементов конструкции трансформаторов

На рисунке 2.11 показаны:

- график 1 – исходное значение температуры среднего перегрева обмотки сверх температуры масла, аппроксимирующая функция (полиномиальная)

$$\theta_{обм.сред.м} = -0,2t^3 + 1,9t^2 - 5,6t + 30; \quad (2.49)$$

- график 2 – исходное значение температуры среднего перегрева масла сверх температуры охлаждающего воздуха, аппроксимирующая функция (полиномиальная)

$$\theta_{\text{м.сред}} = -0,5t^3 + 3,6t^2 - 10,6t + 36; \quad (2.50)$$

- график 3 – исходное значение температуры перегрева масла сверх температуры охлаждающего воздуха, аппроксимирующая функция (полиномиальная)

$$\theta_{\text{м}} = -0,6t^3 + 4,6t^2 - 13,5t + 39,3; \quad (2.51)$$

- график 4 – значение температуры перегрева наиболее нагретой точки обмотки сверх температуры охлаждающего воздуха, аппроксимирующая функция (полиномиальная)

$$\theta_{\text{обм.макс}} = -0,9t^3 + 6,6t^2 - 19,3t + 46,4. \quad (2.52)$$

Рисунок 2.11 показывает, что наибольшие фактические значения перегревов (таблица 2.13) не достигают допустимой величины для масла и допустимой величины для наиболее нагретой точки обмотки. Однако, полученные значения перегревов существенно превосходят средний перегрев обмотки трансформаторов сверх значения температуры масла.

На рисунке 2.12 представлены исходные и аппроксимированные суточные графики коэффициентов загрузки трансформаторов 33/11 кВ ПС «Кабун-1» – без учета и с учетом компенсирующих устройств (КУ).

На рисунке 2.12 показаны:

Графики ( $K_{\text{зг}}$ ;  $K_{\text{зг.комп}}$ ;  $K_{\text{зг.комп.от}}$ ) – суточное изменение исходного значения коэффициента загрузки трансформатора без учета, с учетом КУ и ограничений, получено с помощью измерительного цифрового мультиметра (DMK).

Графики ( $K_{\text{зг.апп}}$ ;  $K_{\text{зг.комп.апп}}$ ;  $K_{\text{зг.комп.от.апп}}$ ) – суточное изменение аппроксимированного значения исходного коэффициента загрузки трансформатора без учета, с учетом КУ и ограничений, аппроксимирующая функция (полиномиальная)

$$\begin{aligned}K_{\text{зг.апп}} &= -0,03t^3 + 0,2t^2 - 0,7t + 0,9; \\K_{\text{зг.комп.апп}} &= -0,02t^3 + 0,2t^2 - 0,6t + 0,8; \\K_{\text{зг.комп.от.апп}} &= -0,02t^3 + 0,1t^2 - 0,3t + 0,6.\end{aligned}\tag{2.53}$$

Графики  $(K_{\text{зг.сред}}; K_{\text{зг.сред.комп}}; K_{\text{зг.сред.комп.от}}) = (0,80; 0,75; 0,53)$  – средние значения коэффициента загрузки без учета, с учетом КУ и учетом КУ и ограничений.

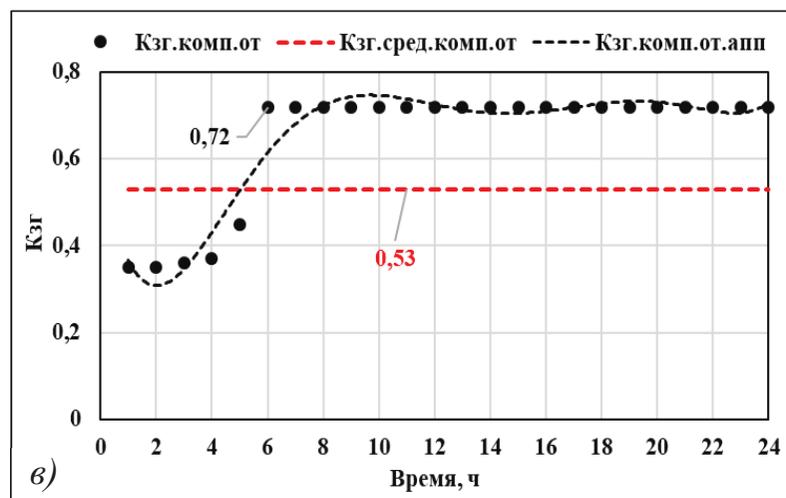
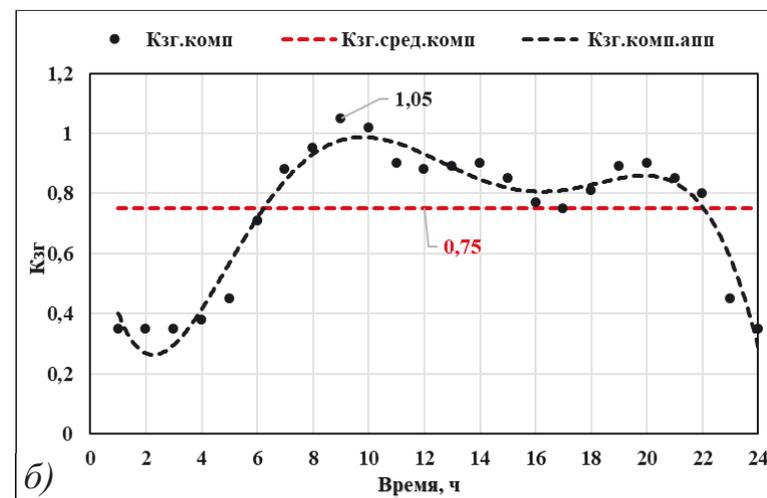
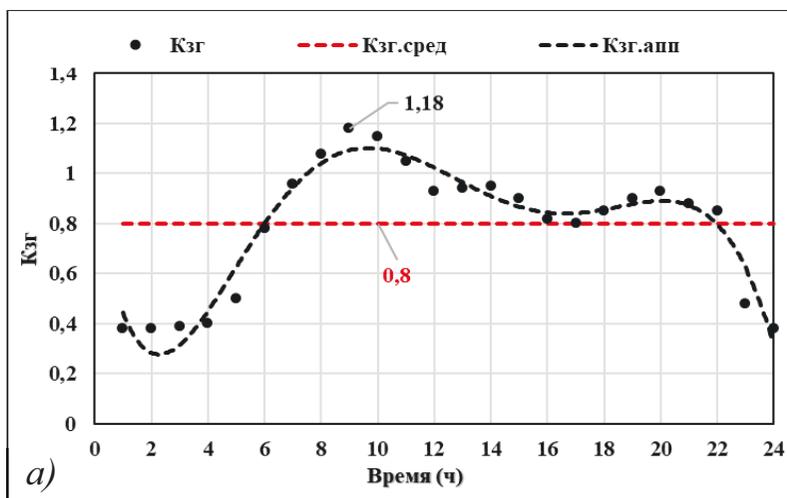


Рисунок 2.12 – Суточные графики коэффициентов загрузки трансформаторов 33/11 кВ ПС «Кабун-1»:

а) без учета КУ; б) с учетом КУ; в) с учетом КУ и ограничений

На рисунке 2.13 представлены исходные и аппроксимированные суточные графики температуры нагрева обмоток трансформаторов ПС «Кабун-1».

На рисунке 2.13 показано

Графики  $(t_{\text{обм}}; t_{\text{обм.комп}}; t_{\text{обм.комп.от}})$  – суточное изменение исходной температуры нагрева обмотки трансформатора без учета, с учетом КУ и ограничений;

Графики  $(t_{\text{обм.апп}}; t_{\text{обм.комп.апп}}; t_{\text{обм.комп.от.апп}})$  – суточное изменение аппроксимированного значения исходной температуры нагрева обмотки трансформатора без учета, с учетом КУ и ограничений, аппроксимирующая функция (полиномиальная)

$$\begin{aligned}t_{\text{обм.апп}} &= -0,8t^3 + 5,8t^2 - 17,1t + 98,8; \\t_{\text{обм.комп.апп}} &= -0,4t^3 + 3,8t^2 - 11,7t + 93,1; \\t_{\text{обм.комп.от.апп}} &= -0,2t^3 + 1,4t^2 - 3,8t + 86,4.\end{aligned}\tag{2.54}$$

Графики  $(t_{\text{обм.сред}}; t_{\text{обм.сред.комп}}; t_{\text{обм.сред.комп.от}}) = (92\text{ }^\circ\text{C}; 90\text{ }^\circ\text{C}; 86\text{ }^\circ\text{C})$  – средние значения температуры нагрева обмотки без учета, с учетом КУ и ограничений.

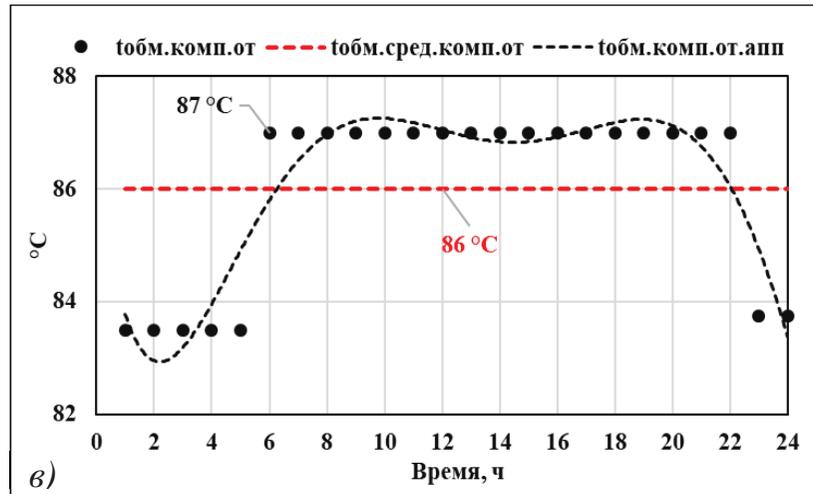
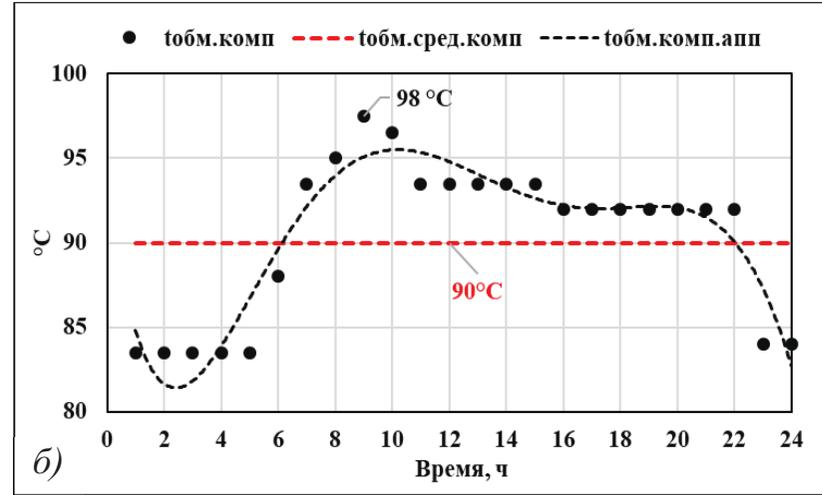
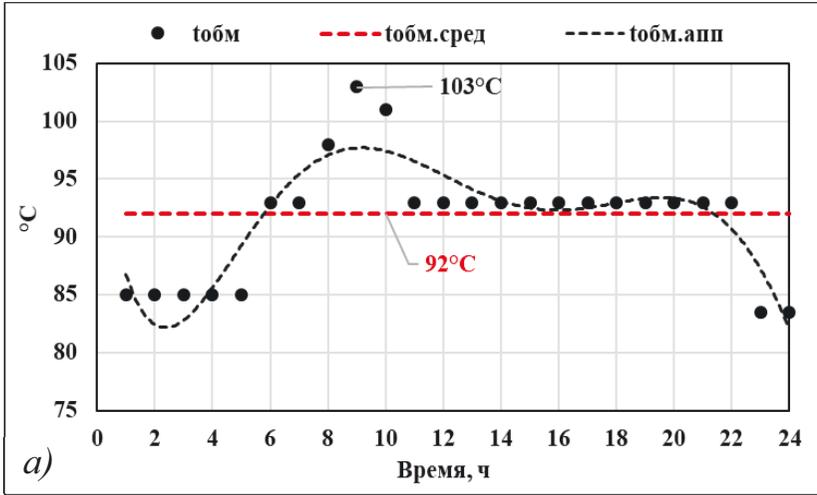


Рисунок 2.13 – Суточные графики температуры нагрева обмоток трансформаторов 33/11 кВ ПС «Кабун-1»:  
 а) без учета КУ; б) с учетом КУ; в) с учетом КУ и ограничений

Установлено максимальное значение температуры нагрева обмотки 103 °С, что превышает допустимое значение  $t_{обм.сред.дон}=85$  °С. С помощью (2.48) и ( $K_{зс}=1$ ) установлено значение эквивалентной средней температуры нагрева обмоток  $t_{обм.сред.экв}=96$  °С, что превышает допустимое значение  $t_{обм.сред.дон}=85$  °С.

$$\left. \begin{aligned} t_{обм.сред}(t = 1ч) &= 11,7(1)^2 + 4(1) + 79,7 \\ t_{обм.сред}(t = 1ч) &= 96 \text{ °С} \end{aligned} \right\} \Rightarrow t_{обм.сред} > t_{обм.сред.доп}. \quad (2.55)$$

Эквивалентное по тепловому износу значение среднего перегрева обмотки  $\theta_{обм.сред.экв}$  вычисляем по значению изменяющегося в течение времени перегрева  $\theta_{обм.сред}(t)$

$$\theta_{обм.сред.экв} = \frac{1}{C} e^{-C \cdot \theta_{обм.сред}(t)} \Delta t (t_2 - t_1), \quad (2.56)$$

где  $C = 0,115$  – значение коэффициента, определяющего величину скорости старения изоляции;  $(t_2 - t_1)$  – интервал времени, на котором исследуется процесс теплового износа;  $\Delta t$  – интервал постоянной нагрузки.

Для исследуемых условий  $t_2 - t_1 = 24$  ч,  $t = 1$  час, тогда на рисунке 2.13а имеем

$$\left. \begin{aligned} t_{обм.сред} &= 96 \text{ °С} \\ \theta_{о.с.экв} &= 28 \text{ °С} \end{aligned} \right\} \Rightarrow 96 - 28 = 68 \text{ °С}. \quad (2.57)$$

С помощью (2.56) и рисунка (2.13; А):

$$68 = 209 e^{-0,115 \cdot \theta_{обм.сред}} \Rightarrow \theta_{обм.сред} = 10 \text{ °С}. \quad (2.58)$$

Следовательно, необходимо снизить загрузку трансформаторов 33/11 кВ. Способы снижения загрузки трансформаторов:

1. Замена трансформаторов  $S_{ном}=20$  МВА на трансформаторы большей номинальной мощности [69-71].
2. Установка устройств компенсации реактивной мощности на промышленных объектах.
3. Выравнивание графиков нагрузок для снижения наибольших нагрузок [19].
4. Снижение мощности нагрузок электропотребителей на промышленных объектах [20].

Трансформаторы с номинальной мощностью, большей 20 МВА напряжением 33/11 кВ, в настоящее время не производятся в связи с введением экономических

санкций со стороны недружественных стран по отношению к САР. Возможным способом снижения загрузки является включение на параллельную работу третьего трансформатора с такой же номинальной мощностью, в этом случае, коэффициенты загрузки трансформаторов при максимуме будут менее 0,7. При этом установка дополнительного трансформатора требует дополнительных капитальных затрат и увеличение площади ПС.

Поэтому вариант подключения дополнительных мощностей трансформаторов не рассматривается. Исследуем возможные способы снижения загрузки трансформаторов и влияния данных способов на температуру нагрева обмоток.

### 2.2.6. Оценка относительной величины срока службы трансформаторов 33/11 кВ подстанции «Кабун-1»

Относительный срок службы ( $T_{с.сл}^*$ ) – отношение реального срока службы ( $T_{реал}$ ) к паспортному ( $T_{пас}$ )

$$T_{с.сл}^* = \frac{T_{реал}}{T_{пас}}. \quad (2.59)$$

Алгоритм оценки относительной величины срока службы включает в себя:

*А. В зависимости от температуры среднего нагрева обмотки:* на рисунке 2.14 представлен график  $T_{с.сл}^*$  в зависимости от температуры среднего нагрева обмотки  $t_{обм.сред}$  при использовании «шестиградусного правила». Согласно данного правила [42, 58], при увеличении температуры нагрева обмотки на 6 °С по отношению к допустимому значению (85 °С), относительный срок службы трансформатора уменьшается в два раза и наоборот – при снижении температуры увеличивается, аппроксимирующая функция

$$T_{с.сл}^* = -0,125t_{обм.сред} + 11,79. \quad (2.60)$$

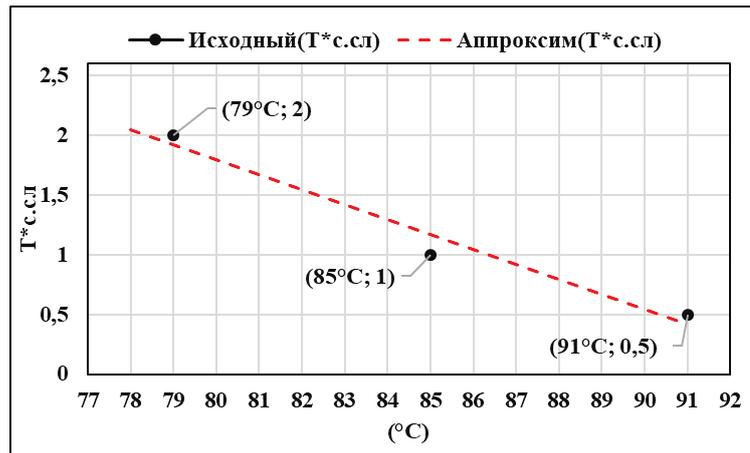


Рисунок 2.14 – Изменение относительного срока службы трансформатора в зависимости от средней температуры нагрева обмотки

Б. В зависимости от коэффициента загрузки: на рисунке 2.15 представлен график  $T_{с.сл}^*$  трансформаторов 33/11кВ ПС «Кабун-1» в зависимости от коэффициента загрузки, полученный с помощью (2.48) и (2.60) и его функция

$$T_{с.сл}^* = -1,46K_{зг}^2 - 0,5K_{зг} + 1,83. \quad (2.61)$$

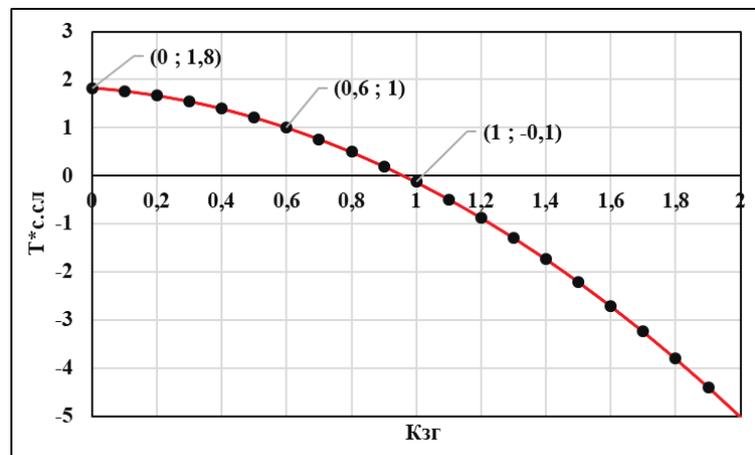


Рисунок 2.15 – Функциональная зависимость относительной величины срока службы трансформаторов 33/11 кВ от величины коэффициента загрузки

На рисунке 2.15 показано:

1. при среднем коэффициенте загрузки  $K_{зг.сред} = 0,6$ , относительная величина срока службы трансформаторов равна 1; температура окружающей среды при этом принята равной 28 °C;

2. при среднем коэффициенте загрузки  $K_{зг.сред} > 0,6$ , относительная величина срока службы трансформаторов меньше 1;

3. при среднем коэффициенте загрузки  $K_{зг.сред}$  большем 1, относительная величина срока службы трансформаторов имеет отрицательные значения, т.е. снижается относительно паспортного значения.

Определим величину  $T_{с.сл}^*$  согласно (2.61) для различных режимов загрузки трансформатора:

1. Без учета КУ (полная мощность нагрузки) –  $K_{зг}=0,8$

$$T_{с.сл}^* = -1,46(0,80)^2 - 0,5(0,80) + 1,83 = 0,5. \quad (2.62)$$

2. С учётом установки КУ в системе электроснабжения (СЭС) Пряд-ткац. фабрики –  $K_{зг}=0,75$

$$T_{с.сл}^* = -1,46(0,75)^2 - 0,5(0,75) + 1,83 = 0,63. \quad (2.63)$$

С помощью (2.60) определены значения температуры среднего нагрева обмотки:

1. Без учета КУ (полная мощность нагрузки).

$$T_{с.сл}^* = 0,5 \Rightarrow t_{обм.сред} = \frac{11,79-0,5}{0,125} = 92 \text{ }^\circ\text{C}. \quad (2.64)$$

2. С учётом КУ.

$$T_{с.сл}^* = 0,63 \Rightarrow t_{обм.сред} = \frac{11,79-0,63}{0,125} = 90 \text{ }^\circ\text{C}. \quad (2.65)$$

Основные характеристики исследуемых графических зависимостей представлены в таблице.2.18.

Таблица 2.18 – Основные характеристики нагрузки и температурных режимов трансформаторов ПС «Кабун-1»

| Основные режимы электропотребления нагрузками | $K_{зг.сред}$ | $K_{зг.макс}$ | $t_{обм.сред}$ | $t_{обм.макс}$ | $T_{с.сл}^*$ |
|---|---------------|---------------|----------------|----------------|--------------|
| 1. Полной мощности нагрузки                   | 0,8           | 1,18          | 92 °C          | 103 °C         | 0,5          |
| 2.С учетом КУ                                 | 0,75          | 1,05          | 90 °C          | 98 °C          | 0,63         |
| 3. С учетом КУ и ограничений                  | 0,53          | 0,72          | 86 °C          | 87 °C          | 1,15         |

Т.о. выявлено, что с учётом установки КУ на Пряд-ткац. фабрике (данные таблицы 2.18), температура нагрева обмотки снижается с 92 °С до 90 °С и коэффициент загрузки снижается с 0,80 до 0,75, при этом величина относительного срока службы трансформаторов увеличивается с 0,5 до 0,63.

### 2.3. Реализация компьютерной модели имитационного моделирования схемы электроснабжения с трансформаторами 33/11 кВ подстанции «Кабун-1»

Для исследования составим компьютерную модель, включающую электрооборудование ПС «Кабун-1»: источник питания – сеть 33 кВ, 2 трансформатора мощностью  $S_{ном}=20$  МВА, напряжением 33/11 кВ, 2 кабеля марки Thorne & Derrick International, Великобритания, 11 кВ (расстояние до источника питания 1 км), нагрузка, их параметры показаны в таблице 2.19.

Таблица 2.19 – Параметры элементов ПС «Кабун-1»

| Сеть 33 кВ                                      | ТР 33/11 кВ   |                                | Кабель 11 кВ   | Нагрузка   |
|---|---|--------------------------------|--|--|
|   | Н   | L                              |  |  |
| $S=500$ МВА;<br>$R=0,253$ Ом<br>$L=0,002415$ Гн | $R=0,1568$ Ом<br>$L=0,0058$ Гн<br>$R_M=0,06534$ Ом<br>$L_M=207,98$ Гн | $R=0,0166$ Ом<br>$L=0,0061$ Гн | $L=1$ км<br>$R=0,131$ Ом<br>$L=0,0002$ Гн<br>$C=0,318$ Ф | $\cos\phi=0,8$<br>$S_{макс}=47,2$ МВА<br>$P=37,76$ кВт<br>$Q_L=28,32$ кВАр |

Мультиметр используется для определения токов вторичной обмотки ТР1 и ТР2. Результаты блока измерителя среднеквадратического значения тока вторичной обмотки ТР1 и ТР2  $I=914,4$  А. Для исследования выбрано 6 значений токов вторичной обмотки первого и второго трансформатора.

С помощью (2.48)

$$K_{зг} = \frac{I}{I_{ном}}; \quad I_{ном} = \frac{20}{\sqrt{3} \times 0,11} = 1050 \text{ А};$$

$$t_{обм.сред} = 11,7 \left( \frac{I}{1050} \right)^2 + 4 \left( \frac{I}{1050} \right) + 79,7. \quad (2.66)$$

где  $I$  – ток вторичной обмотки трансформатора, рассчитанный в среде MATLAB/Simulink, подставим в блок параметров функции  $t_{обм.сред}$ .

При использовании программного пакета MATLAB, Simulink, Sim Power System смоделируем исследуемую схему, представленную на рисунке 2.16. Проведенные исследования показывают совпадение результатов расчета при помощи имитационного моделирования и разработанного аналитического выражения (таблица 2.18) для вычисления значения температуры среднего нагрева обмотки трансформатора (без учета КУ и с учетом КУ) имеет погрешность, не превышающую 1 %.

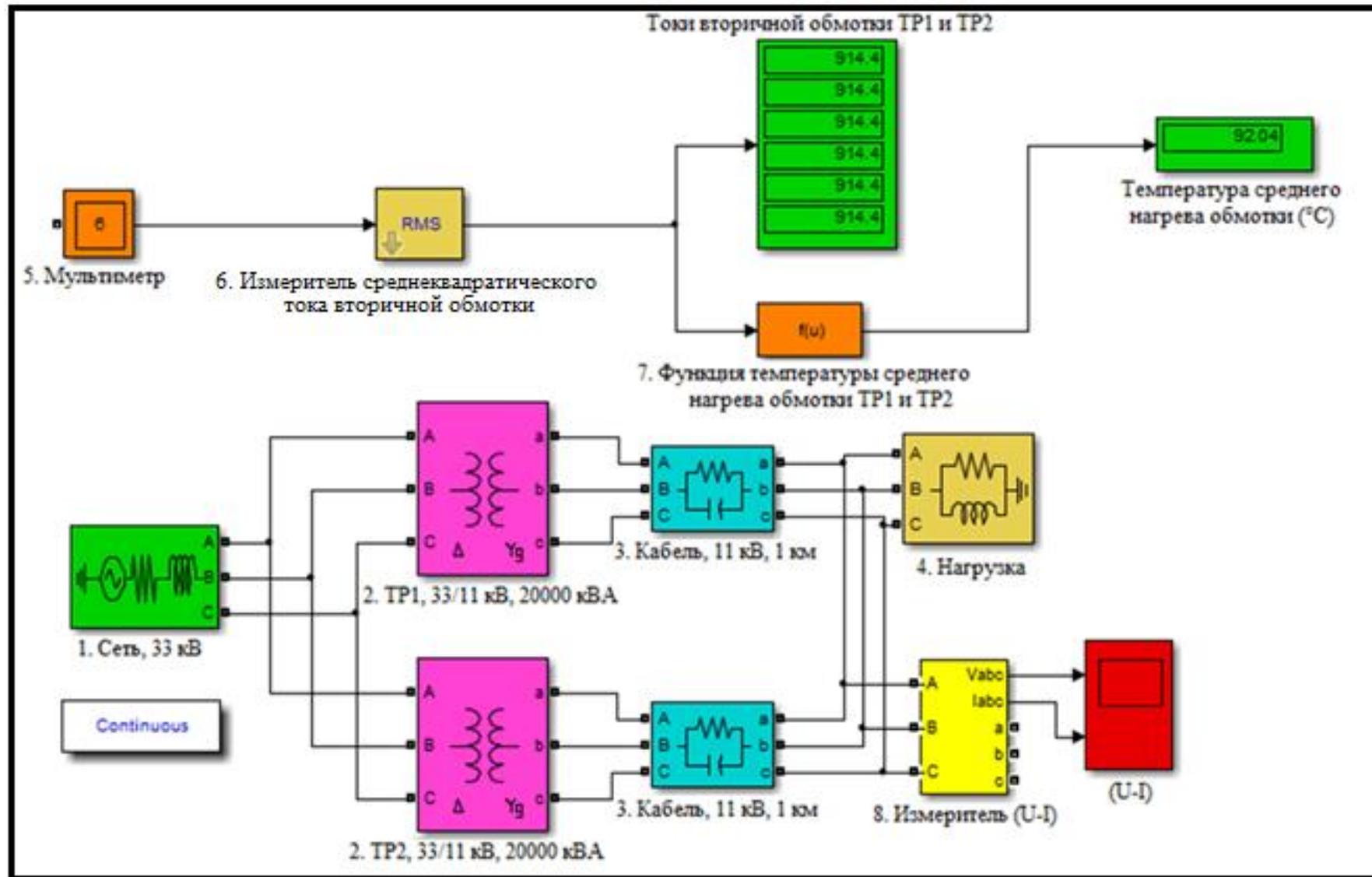


Рисунок 2.16 – Схема модели ПС «Кабун-1», реализованная в среде MATLAB /Simulink.

## 2.4. Характерные суточные графики полной мощности нагрузки некоторых производств и промышленных предприятий

В результате проведенных исследований различных видов типовых суточных графиков нагрузок предприятий некоторых отраслей промышленности (рисунок 2.17) выявлены графики нагрузок, которые наиболее достоверно аппроксимируются с помощью функции косинуса.

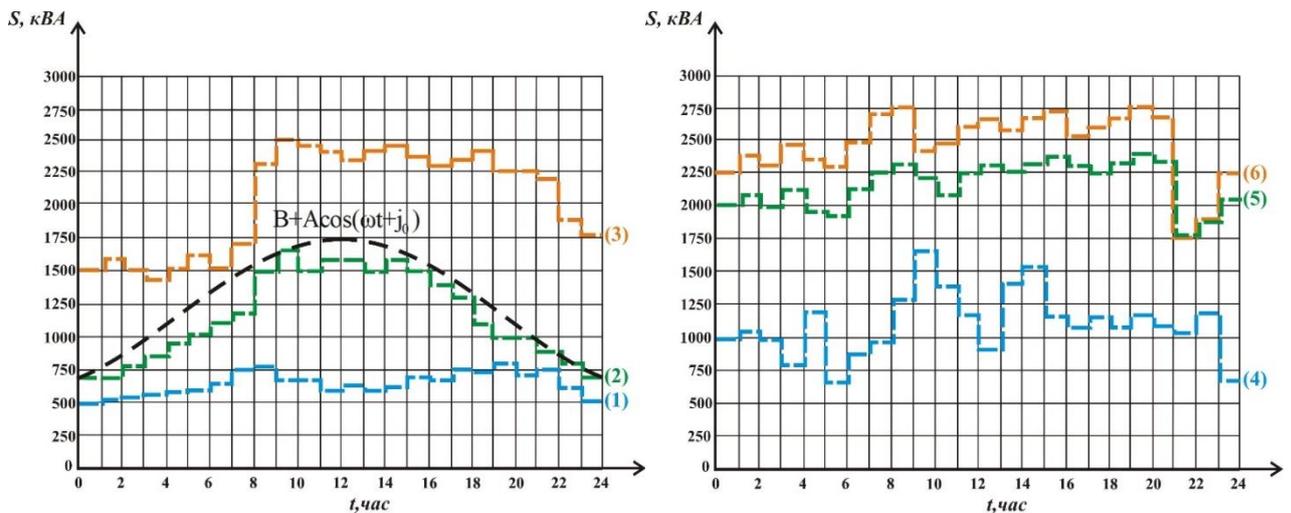


Рисунок 2.17 – Характерные суточные графики полной мощности нагрузки некоторых производств и промышленных предприятий:

1 – производственные цеха бумажных комбинатов; 2 – производственные цеха прядильно-ткацких фабрик; 3 – производственные цеха деревообрабатывающих комбинатов и мебельных фабрик; 4 – цеха заводов по производству цемента; 5 – цеха табачных фабрик; 6 – нефтеперерабатывающие станции

## 2.5. Выводы по главе

1. Представлен анализ СЭС промышленной зоны г. Адра (САР), основными электропотребителями которого являются Прядильно-ткацкая фабрика, Механическая мастерская, Завод соков, коммунально-бытовые потребители 11 кВ и коммунально-бытовые потребители 0,4 кВ. Определены параметры графиков их нагрузок.

2. Определены значения коэффициентов корреляции между нагрузками промышленных электропотребителей и доказана существенная статистическая взаимосвязь между мощностями нагрузок присоединений трансформаторов ПС «Кабун-1». При этом установлено, что нагрузки промышленных электропотребителей имеют существенную положительную корреляционную взаимосвязь, следствием которой является значительная вариация суммарных мощностей нагрузок и их различие в величине максимальной и средней нагрузки.

3. Показано, что регулирование максимальной суммарной мощности нагрузок целесообразно, т.к. имеется относительное смещение времени начала работы отдельных электропотребителей: Прядильно-ткацкой фабрики, Механической мастерской и Завода по производству соков.

4. При исследовании потребления ЭЭ нагрузками Нового сектора г. Адра доказано совпадение между экспериментальным и теоретическим значением максимума мощности нагрузки коммунально-бытовых электропотребителей.

5. Разработаны модели аппроксимирующих функций температурных параметров элементов силовых трансформаторов. Определены коэффициенты детерминации ( $R^2$ ) и средняя ошибка аппроксимации ( $A$  %), которые показали, что полиномиальная функция является наиболее достоверной.

6. Разработана методика оценки температуры перегрева элементов трансформатора в конце интервала времени постоянной нагрузки, позволяющая учитывать параметры эксплуатации (загрузку и климатические условия). Определена функция средней температуры нагрева обмотки трансформаторов ПС «Кабун-1» ( $t_{обм.сред}$ ) при эквивалентной годовой температуре для климата САР.

7. Разработан алгоритм оценки относительного срока службы силовых трансформаторов за рассматриваемый период времени характерной нагрузки с учётом коэффициента загрузки и различных условий окружающей среды.

8. Доказано, что при установке компенсирующих устройств коэффициент загрузки уменьшается с 0,80 до 0,75, а температура нагрева обмотки трансформаторов снижается с 92 °С до 90 °С. При этом величина относительного срока службы трансформаторов увеличивается с 0,5 до 0,63.

9. Разработана имитационная модель в программной среде MATLAB электрической схемы трансформаторов 33/11 кВ ПС «Кабун-1» и нагрузки. При этом показано совпадение результатов моделирования со значением разработанной функции аппроксимации температуры среднего нагрева обмотки трансформатора с погрешностью, не превышающей 1 %.

### 3. СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСХОДНЫХ ГРАФИКОВ НАГРУЗОК ЭЛЕКТРОПОТРЕБИТЕЛЕЙ ПОДСТАНЦИИ «КАБУН-1» И ИХ АППРОКСИМИРУЮЩИЕ ФУНКЦИИ

#### 3.1. Исходные графики нагрузок трансформаторов 11/0,4 кВ Прядильно-ткацкой фабрики и их параметры

Режим работы Пряд-ткац. фабрики – двухсменный. На фабрике установлены трансформаторы с  $S_{ном-i}=1$  МВА. Пряд-ткац. фабрика питается от ПС «Кабун-1» по кабелям на  $U_{ном}=11$  кВ. Для определения параметров графиков нагрузок Пряд-ткац. фабрики экспериментально измерены: активные, реактивные и полные мощности нагрузок 36 трансформаторов,  $S_{ном-i}=1$  МВА, интервал измерений параметров составляет 1 час в течение 6 суток. Технические паспортные данные трансформатора 11/0,4 кВ даны в таблице 3.1 [72].

Таблица 3.1 – Основные характеристики трансформатора 11/0,4 кВ

|                  |                       |
|------------------|-----------------------|
| Тип (Марка)      | ELSEWEDY (Египет)     |
| Охлаждение       | ONAN                  |
| Тип охлаждения   | Д                     |
| Фаз              | 3                     |
| Частота          | 50 Гц                 |
| $S_{ном}$        | 1000 кВА              |
| Векторный группа | D/Y <sub>n</sub> – 11 |
| В.Н              | 11 кВ                 |
| Н.Н              | 0,4 кВ                |
| $Z_T$            | 5 %                   |
| В.І              | 52,48 А               |
| Н.І              | 1443,4 А              |
| Класс изоляции   | А                     |

Для экспериментальных исследований использованы измерительные цифровые приборы DMK 20 (рисунок 3.1), при помощи которых возможно проводить измерения и контроль основных электрических характеристик схем сетей – напряжений и токов, различных видов мощности и коэффициентов мощности и т.д. Паспортные данные DMK 20 представлены в таблице 3.2 [73].

Таблица 3.2 – Основные характеристики цифрового прибора DMK 20 (Италия-L)

| Тип корпуса                             | Встраиваемый, 96 x 96 мм                           |
|---|--|
| Номинальное напряжение питания          | 208 ~ 240 VAC                                      |
| Номинальная частота                     | 45/65 Гц   |
| Максимальная рассеиваемая мощность      | 2,5 Вт   |
| Время стойкости к микропрерываниям      | 20 мс  |
| Номинальное напряжение изоляции         | 690 VAC  |
| Диапазон измерения напряжения           | 60 ~ 830 VAC фаза-фаза, 30 ~ 480 VAC фаза-нейтраль |
| Диапазон частоты измеряемого напряжения | 45/65 Гц   |
| Диапазон измерения тока                 | 0,05 ~ 6 А   |
| Метод измерений                         | True RMS   |
| Способ подключения                      | Через внешний трансформатор с вторичным током 5 А  |
| Интерфейс связи                         | Нет  |
| Тип зажимов для подключения             | Съемные  |
| Материал корпуса                        | Самозатухающий черный пластик                      |
| Степень защиты                          | IP54 для передней панели, IP20 для зажимов         |
| Рабочая температура                     | -20 °C ... +60 °C                                  |
| Интервал измерения                      | 60 мин   |
| Вес                                     | 0,434 кг   |
| Класс точности                          | ±0,5 %   |



Рисунок 3.1 – Цифровой прибор DMK 20

Результаты статистической обработки экспериментальных данных позволили определить совокупность почасовых значений суточных графиков активной мощности  $P_{mp-i}(t)$ , тока  $I_{mp-i}(t)$ , получено 6 графиков для каждого исследуемого трансформатора. На рисунке 3.2 даны графические зависимости активной мощности по дням недели для первого трансформатора ТР1 (Пятница выходной).

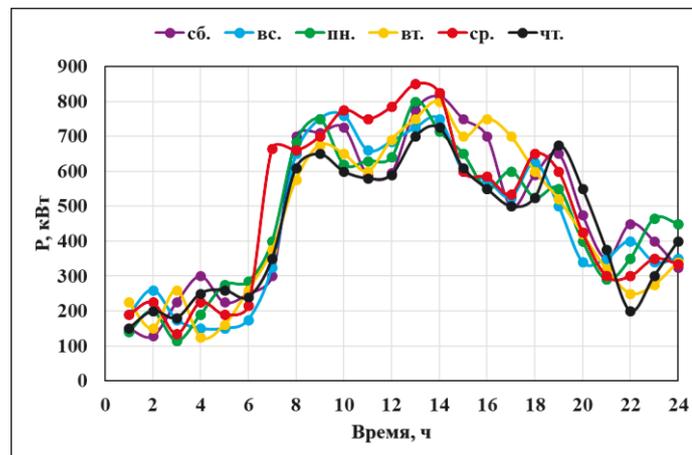
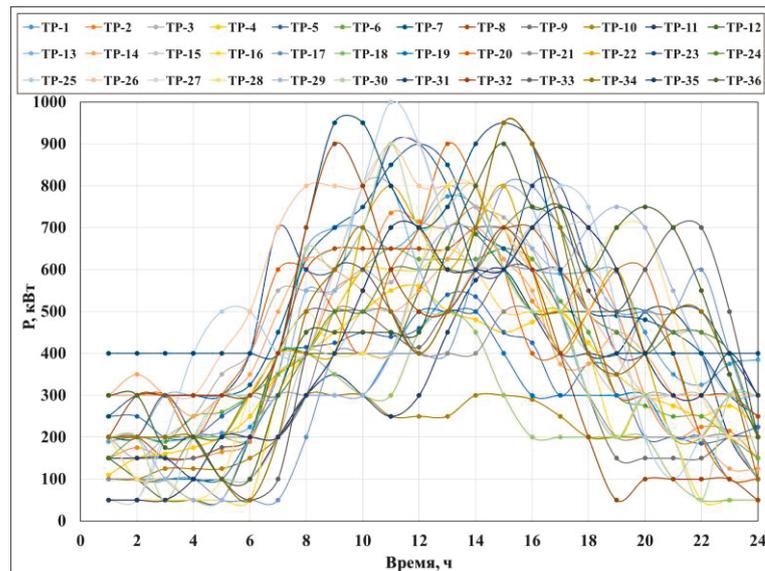


Рисунок 3.2 – Статистические графики активных нагрузок по дням недели для первого трансформатора Прядельно-ткацкой фабрики

Фабрика работает в двухсменном режиме с 7:00 ч до 23:00 ч. Для ночного времени характерно значительное снижение нагрузки. Зафиксировано по

результатам измерений 2 максимума: в 13:30 ч – 14:30 ч – дневной максимум и в 18:30 ч – 19:30 ч – вечерний максимум.

Исследуемые величины временного ряда активной мощности каждого из установленных на фабрике 36 трансформаторов и значения средних за рассматриваемые часы суток в соответствии с графиком нагрузок за неделю показаны на рисунке 3.3.



*Рисунок 3.3 – Графики средних активных нагрузок 36 трансформаторов  
Прядильно-ткацкой фабрики*

Полученные данные регистрограмм токов позволяют определить и представить в таблице 3.3 следующие параметры средних значений за каждый час (например, для первого трансформатора).

1. Средние значения полной мощности временных рядов за соответствующие часы суток по графику нагрузок за неделю для каждого  $i$ -ого трансформатора, рассчитанные по выражению

$$S_{\text{тр.}i.\text{сред}} = \sqrt{3} \cdot I_{\text{тр.}i.\text{сред}} \cdot U_{\text{ном.тр}} = 225 \text{ кВА}. \quad (3.1)$$

2. Средние значения реактивной мощности временных рядов за соответствующие часы суток по графику нагрузок за неделю для каждого  $i$ -ого трансформатора, вычисляемые по выражению

$$Q_{\text{тр.}i.\text{сред}} = \sqrt{S_{\text{тр.}i.\text{сред}}^2 - P_{\text{тр.}i.\text{сред}}^2} = 135 \text{ кВАр.} \quad (3.2)$$

3. Средние значения коэффициента мощности

$$\cos \varphi_{\text{тр.}i.\text{сред}} = \frac{P_{\text{тр.}i.\text{сред}}}{S_{\text{тр.}i.\text{сред}}} = 0,8. \quad (3.3)$$

На рисунке 3.4 и 3.5 показаны графические зависимости тока, активных, реактивных и полных мощностей нагрузок трансформаторов Пряд-ткац. фабрики.

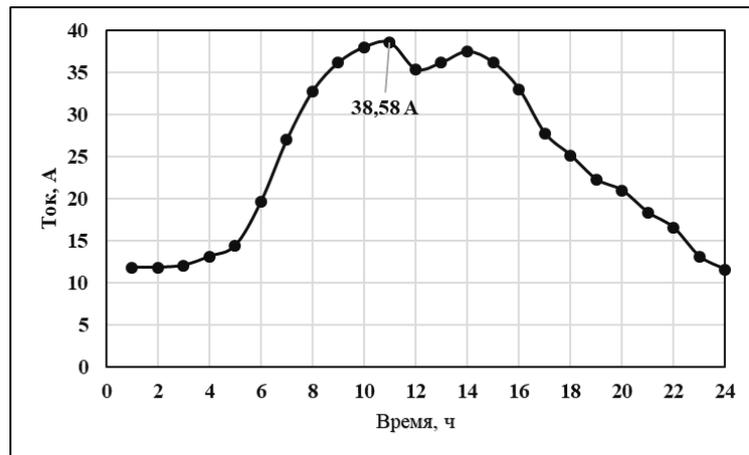


Рисунок 3.4 – График среднего тока трансформаторов Прядильно-ткацкой фабрики

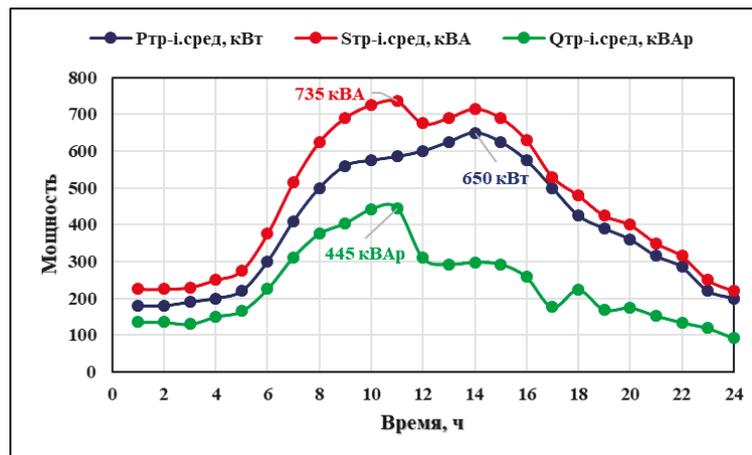


Рисунок 3.5 – Графики средних активных, реактивных и полных мощностей нагрузок трансформаторов Прядильно-ткацкой фабрики

Таблица 3.3 – Параметры средних часовых величин графиков нагрузок трансформаторов Прядильно-ткацкой фабрики

| Время, ч | $P_{mp-i.сред}$ , кВт | $I_{mp-i.сред}$ , А | $S_{mp-i.сред}$ , кВА | $Q_{mp-i.сред}$ , кВАр | $\cos(\phi)_{mp-i.сред}$ |
|----------|-----------------------|---------------------|-----------------------|------------------------|--------------------------|
| 1        | 180                   | 11,81               | 225,01                | 135,02                 | 0,8                      |
| 2        | 180                   | 11,81               | 225,01                | 135,02                 | 0,8                      |
| 3        | 190                   | 12,07               | 229,96                | 129,54                 | 0,83                     |
| 4        | 200                   | 13,12               | 249,97                | 149,95                 | 0,8                      |
| 5        | 220                   | 14,43               | 274,93                | 164,88                 | 0,8                      |
| 6        | 300                   | 19,68               | 374,95                | 224,92                 | 0,8                      |
| 7        | 410                   | 27,03               | 514,99                | 311,63                 | 0,8                      |
| 8        | 500                   | 32,8                | 624,92                | 374,87                 | 0,8                      |
| 9        | 560                   | 36,22               | 690,08                | 403,25                 | 0,81                     |
| 10       | 575                   | 38,05               | 724,95                | 441,51                 | 0,79                     |
| 11       | 585                   | 38,58               | 735,05                | 445,05                 | 0,8                      |
| 12       | 600                   | 35,43               | 675,03                | 309,3                  | 0,89                     |
| 13       | 625                   | 36,22               | 690,08                | 292,55                 | 0,91                     |
| 14       | 650                   | 37,53               | 715,04                | 297,96                 | 0,91                     |
| 15       | 625                   | 36,22               | 690,08                | 292,55                 | 0,91                     |
| 16       | 575                   | 33,07               | 630,07                | 257,61                 | 0,91                     |
| 17       | 500                   | 27,82               | 530,04                | 175,9                  | 0,94                     |
| 18       | 425                   | 25,19               | 479,93                | 222,95                 | 0,89                     |
| 19       | 390                   | 22,31               | 425,06                | 169,04                 | 0,92                     |
| 20       | 360                   | 20,99               | 399,91                | 174,15                 | 0,9                      |
| 21       | 315                   | 18,37               | 350                   | 152,56                 | 0,9                      |
| 22       | 285                   | 16,53               | 314,94                | 134,02                 | 0,9                      |
| 23       | 220                   | 13,12               | 249,97                | 118,68                 | 0,88                     |
| 24       | 200                   | 11,55               | 220,06                | 91,8                   | 0,91                     |
| Сред     | 402,92                | 24,58               | 468,33                | 233,53                 | 0,86                     |
| Макс     | 650                   | 38,58               | 735,05                | 445,05                 | 0,94                     |

На рисунке 3.4 и 3.5 показано, что максимальные величины активной мощности нагрузок трансформаторов наблюдаются в 13:00 ч – 15:00 ч, а нагрузка полной мощности и тока в 9:00 ч – 12:00 ч, что совпадает с максимальными величинами реактивной мощности нагрузки.

На рисунке 3.6 представлен график суточных среднечасовых значений активной мощности нагрузок для первого трансформатора.

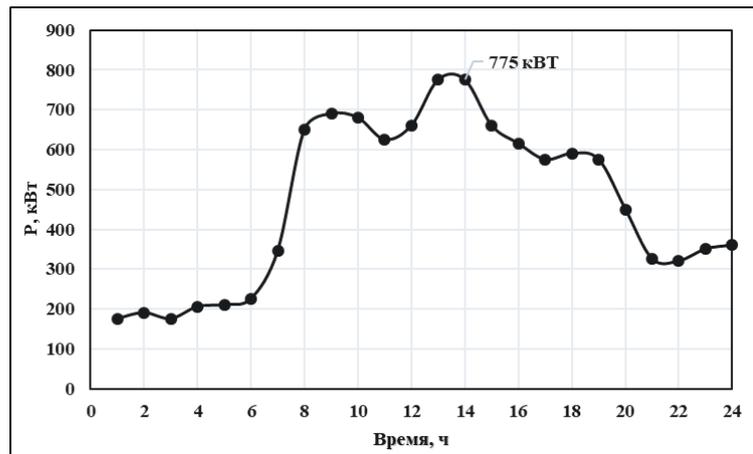


Рисунок 3.6 – График значений среднечасовой активной мощности нагрузки первого трансформатора

По данным рисунка 3.6 рассчитаны значения характеристик исходной активной мощности нагрузки [74-76] за сутки для первого трансформатора.

1. Среднее значение активной мощности нагрузки

$$(P_{\text{сред}})_{\text{тр1}} = (M_P)_{\text{тр1}} = \frac{\sum_{i=1}^{24} P_i}{24} = 466 \text{ кВт.} \quad (3.4)$$

2. Среднеквадратическое отклонение активной мощности нагрузки

$$(\sigma_P)_{\text{тр1}} = \sqrt{\sum_{i=1}^{24} \frac{(P_i - P_{\text{сред}})^2}{24}} = 208 \text{ кВт.} \quad (3.5)$$

3. Коэффициент вариации нагрузки

$$(\gamma_P)_{\text{тр1}} = \frac{(\sigma_P)_{\text{тр1}}}{(P_{\text{сред}})_{\text{тр1}}} = 0,44. \quad (3.6)$$

4. Максимальное значение активной мощности нагрузки

$$(P_{\text{макс}})_{\text{тр1}} = 775 \text{ кВт.} \quad (3.7)$$

5. Максимальное значение коэффициента загрузки трансформатора за сутки

$$(K_{\text{зг.макс}})_{\text{тр1}} = \frac{(P_{\text{макс}})_{\text{тр1}}}{1000} = 0,775. \quad (3.8)$$

6. Среднее значение коэффициента загрузки трансформатора за сутки

$$(K_{\text{зг.сред}})_{\text{тр1}} = \frac{(P_{\text{сред}})_{\text{тр1}}}{1000} = 0,445. \quad (3.9)$$

На рисунке 3.7 показано распределение мощности средней полной нагрузки трансформаторов для различного периода времени: за полные сутки (средсутки); за первую смену (средперсм); за вторую смену (средвторсм); суммарное за первую и вторую смену (средвсем); за период максимальной нагрузки с 11:00 ч до 15:00 ч (сред11 – 15).

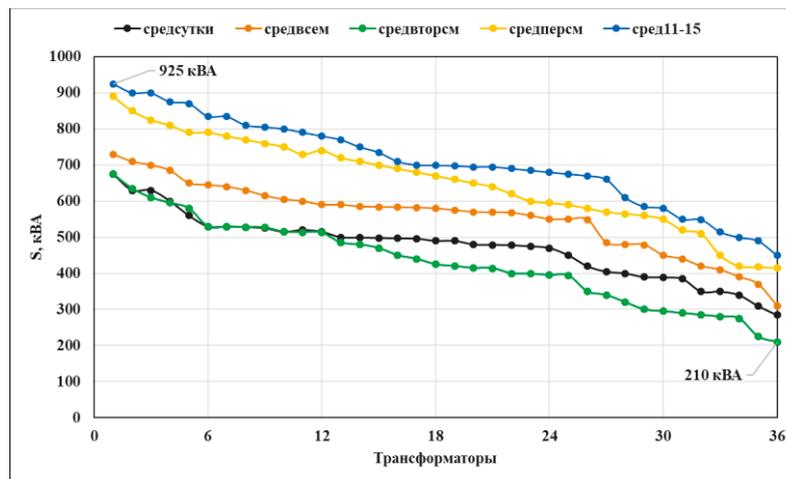


Рисунок 3.7 – Распределение средней полной мощности нагрузки трансформаторов за различные интервалы времени

Рисунок 3.7 показывает, что:

1. наибольшие величины мощности средней полной нагрузки трансформаторов выявлены за первую смену (средперсм) и (сред11 – 15);
2. наименьшие величины мощности средней полной нагрузки трансформаторов выявлены за вторую смену (средвторсм) и за полные сутки (средсутки);

3. средние величины полной мощности нагрузки (без учёта КУ) изменяются от 210 до 925 кВА.

### 3.2. Определение значений статистических характеристик нагрузок трансформаторов 11/0,4 кВ Пряильно-ткацкой фабрики

Для исследуемых трансформаторов результаты вычислений активной, полной и реактивной мощности представлены в таблицах 3.4, 3.5. и 3.6.

Таблица 3.4 – Статистические параметры характеристик активной мощности нагрузки за сутки трансформаторов Пряильно-ткацкой фабрики

| ТР | $M_P$ , кВт | $\sigma_P$ , кВт | $\gamma_P$ | $P_{\max}$ , кВт | $K_{зг.\max}$ | $K_{зг.\text{сред}}$ |
|----|-------------|------------------|------------|------------------|---------------|----------------------|
| 1  | 466         | 208              | 0,44       | 770              | 0,77          | 0,46                 |
| 2  | 409         | 231              | 0,56       | 730              | 0,73          | 0,40                 |
| 3  | 458         | 197              | 0,43       | 810              | 0,81          | 0,46                 |
| 4  | 350         | 138              | 0,39       | 550              | 0,55          | 0,35                 |
| 5  | 329         | 119              | 0,36       | 530              | 0,53          | 0,33                 |
| 6  | 404         | 187              | 0,46       | 630              | 0,63          | 0,40                 |
| 7  | 520         | 210              | 0,40       | 900              | 0,9           | 0,52                 |
| 8  | 427         | 213              | 0,50       | 700              | 0,7           | 0,43                 |
| 9  | 321         | 173              | 0,53       | 600              | 0,6           | 0,32                 |
| 10 | 209         | 73               | 0,35       | 300              | 0,3           | 0,21                 |
| 11 | 310         | 162              | 0,52       | 600              | 0,6           | 0,31                 |
| 12 | 352         | 211              | 0,60       | 700              | 0,7           | 0,35                 |
| 13 | 425         | 219              | 0,52       | 800              | 0,8           | 0,43                 |
| 14 | 431         | 151              | 0,35       | 700              | 0,7           | 0,43                 |
| 15 | 333         | 197              | 0,60       | 700              | 0,7           | 0,33                 |
| 16 | 304         | 233              | 0,77       | 650              | 0,65          | 0,30                 |
| 17 | 374         | 243              | 0,65       | 800              | 0,8           | 0,37                 |
| 18 | 247         | 128              | 0,52       | 500              | 0,5           | 0,25                 |

Продолжение таблицы 3.4

|      |     |     |      |     |      |      |
|------|-----|-----|------|-----|------|------|
| 19   | 267 | 131 | 0,49 | 500 | 0,5  | 0,27 |
| 20   | 448 | 203 | 0,45 | 850 | 0,85 | 0,45 |
| 21   | 288 | 145 | 0,50 | 500 | 0,5  | 0,29 |
| 22   | 429 | 211 | 0,49 | 800 | 0,8  | 0,43 |
| 23   | 542 | 205 | 0,38 | 900 | 0,9  | 0,54 |
| 24   | 433 | 179 | 0,41 | 750 | 0,75 | 0,43 |
| 25   | 483 | 273 | 0,57 | 980 | 0,98 | 0,48 |
| 26   | 538 | 221 | 0,41 | 900 | 0,9  | 0,54 |
| 27   | 444 | 266 | 0,60 | 900 | 0,9  | 0,44 |
| 28   | 424 | 233 | 0,55 | 800 | 0,8  | 0,42 |
| 29   | 419 | 233 | 0,55 | 750 | 0,75 | 0,41 |
| 30   | 415 | 241 | 0,58 | 850 | 0,85 | 0,42 |
| 31   | 575 | 225 | 0,39 | 950 | 0,95 | 0,58 |
| 32   | 376 | 247 | 0,65 | 850 | 0,85 | 0,38 |
| 33   | 467 | 256 | 0,55 | 950 | 0,95 | 0,48 |
| 34   | 430 | 251 | 0,58 | 920 | 0,92 | 0,43 |
| 35   | 406 | 236 | 0,58 | 750 | 0,75 | 0,41 |
| 36   | 464 | 230 | 0,49 | 860 | 0,86 | 0,46 |
| Сред | 403 | 202 | 0,50 | 743 | 0,75 | 0,40 |
| Макс | 575 | 273 | 0,77 | 980 | 0,98 | 0,58 |
| Мин  | 209 | 73  | 0,35 | 300 | 0,3  | 0,21 |

Таблица 3.5 – Статистические параметры характеристик полной мощности нагрузки за сутки трансформаторов Прядильно-ткацкой фабрики

| ТР | $M_S$ , кВА | $\sigma_S$ , кВА | $\gamma_S$ | $S_{\max}$ , кВА | $K_{зл.\max}$ | $K_{зл.\text{сред}}$ |
|----|-------------|------------------|------------|------------------|---------------|----------------------|
| 1  | 537         | 238              | 0,44       | 924              | 0,92          | 0,54                 |
| 2  | 474         | 262              | 0,55       | 908              | 0,91          | 0,47                 |
| 3  | 527         | 223              | 0,42       | 924              | 0,92          | 0,53                 |
| 4  | 404         | 160              | 0,4        | 684              | 0,68          | 0,4                  |
| 5  | 382         | 143              | 0,38       | 630              | 0,63          | 0,38                 |
| 6  | 471         | 212              | 0,45       | 793              | 0,79          | 0,47                 |
| 7  | 600         | 241              | 0,4        | 1098             | 1,1           | 0,6                  |
| 8  | 495         | 242              | 0,49       | 849              | 0,85          | 0,49                 |
| 9  | 372         | 200              | 0,54       | 705              | 0,7           | 0,37                 |
| 10 | 242         | 84               | 0,35       | 373              | 0,37          | 0,24                 |
| 11 | 353         | 172              | 0,49       | 658              | 0,66          | 0,35                 |
| 12 | 402         | 232              | 0,58       | 768              | 0,77          | 0,4                  |
| 13 | 496         | 255              | 0,51       | 995              | 1             | 0,5                  |
| 14 | 499         | 177              | 0,35       | 829              | 0,83          | 0,5                  |
| 15 | 381         | 221              | 0,58       | 792              | 0,79          | 0,38                 |
| 16 | 351         | 267              | 0,76       | 787              | 0,79          | 0,35                 |
| 17 | 423         | 263              | 0,62       | 877              | 0,88          | 0,42                 |
| 18 | 288         | 151              | 0,52       | 581              | 0,58          | 0,29                 |
| 19 | 307         | 146              | 0,48       | 581              | 0,58          | 0,31                 |
| 20 | 517         | 230              | 0,45       | 959              | 0,96          | 0,52                 |
| 21 | 333         | 170              | 0,51       | 622              | 0,62          | 0,33                 |
| 22 | 497         | 238              | 0,48       | 995              | 1             | 0,5                  |
| 23 | 628         | 238              | 0,38       | 1120             | 1,12          | 0,63                 |
| 24 | 498         | 195              | 0,39       | 872              | 0,87          | 0,5                  |
| 25 | 560         | 318              | 0,57       | 1219             | 1,22          | 0,56                 |

|      |     |     |      |      |      |      |
|------|-----|-----|------|------|------|------|
| 26   | 627 | 268 | 0,43 | 1120 | 1,12 | 0,63 |
| 27   | 515 | 303 | 0,59 | 1120 | 1,12 | 0,52 |
| 28   | 483 | 252 | 0,52 | 881  | 0,88 | 0,48 |
| 29   | 476 | 246 | 0,52 | 823  | 0,82 | 0,48 |
| 30   | 483 | 282 | 0,58 | 1057 | 1,06 | 0,48 |
| 31   | 669 | 270 | 0,4  | 1182 | 1,18 | 0,67 |
| 32   | 444 | 297 | 0,67 | 1057 | 1,06 | 0,44 |
| 33   | 533 | 283 | 0,53 | 1049 | 1,05 | 0,53 |
| 34   | 495 | 283 | 0,57 | 1056 | 1,06 | 0,49 |
| 35   | 465 | 260 | 0,56 | 911  | 0,91 | 0,47 |
| 36   | 529 | 244 | 0,46 | 943  | 0,94 | 0,53 |
| Сред | 466 | 230 | 0,48 | 882  | 0,88 | 0,47 |
| Макс | 669 | 318 | 0,76 | 1219 | 1,22 | 0,67 |
| Мин  | 242 | 84  | 0,35 | 373  | 0,37 | 0,24 |

Таблица 3.6 – Статистические параметры характеристик реактивной мощности нагрузки за сутки трансформаторов Прядильно-ткацкой фабрики и рекомендуемые для установки мощности  $Q_{БК}$ ,  $U=0,4$  кВ.

| ТР | $M_Q$ , кВАр | $\sigma_Q$ , кВАр | $\gamma_Q$ | $Q_{\max}$ , кВАр | $K_{зг.\max}$ | $K_{зг.сред}$ | $Q_{БК}$ , кВАр |
|----|--------------|-------------------|------------|-------------------|---------------|---------------|-----------------|
| 1  | 264          | 124               | 0,47       | 511               | 0,51          | 0,26          | 0               |
| 2  | 232          | 136               | 0,59       | 540               | 0,54          | 0,23          | 0               |
| 3  | 259          | 108               | 0,42       | 444               | 0,44          | 0,26          | 0               |
| 4  | 199          | 86                | 0,43       | 407               | 0,41          | 0,2           | 0               |
| 5  | 195          | 81                | 0,42       | 340               | 0,34          | 0,19          | 0               |
| 6  | 235          | 118               | 0,5        | 481               | 0,48          | 0,23          | 0               |
| 7  | 298          | 127               | 0,43       | 629               | 0,63          | 0,3           | 400             |
| 8  | 244          | 128               | 0,53       | 481               | 0,48          | 0,24          | 0               |
| 9  | 185          | 106               | 0,57       | 370               | 0,37          | 0,19          | 0               |
| 10 | 121          | 48                | 0,4        | 222               | 0,22          | 0,12          | 0               |

Продолжение таблицы 3.6

|               |        |        |      |     |      |      |      |
|---------------|--------|--------|------|-----|------|------|------|
| 11            | 167    | 66     | 0,39 | 270 | 0,27 | 0,17 | 0    |
| 12            | 192    | 102    | 0,53 | 315 | 0,32 | 0,19 | 0    |
| 13            | 250    | 142    | 0,57 | 592 | 0,59 | 0,25 | 400  |
| 14            | 251    | 94     | 0,37 | 444 | 0,44 | 0,25 | 0    |
| 15            | 184    | 103    | 0,56 | 370 | 0,37 | 0,18 | 0    |
| 16            | 170    | 137    | 0,81 | 444 | 0,44 | 0,17 | 0    |
| 17            | 195    | 108    | 0,55 | 360 | 0,36 | 0,2  | 0    |
| 18            | 147    | 81     | 0,55 | 296 | 0,3  | 0,15 | 0    |
| 19            | 151    | 69     | 0,46 | 296 | 0,3  | 0,15 | 0    |
| 20            | 257    | 111    | 0,43 | 444 | 0,44 | 0,26 | 0    |
| 21            | 166    | 94     | 0,56 | 370 | 0,37 | 0,17 | 0    |
| 22            | 244    | 123    | 0,5  | 592 | 0,59 | 0,24 | 400  |
| 23            | 314    | 129    | 0,41 | 666 | 0,67 | 0,31 | 500  |
| 24            | 243    | 87     | 0,36 | 444 | 0,44 | 0,24 | 0    |
| 25            | 279    | 171    | 0,61 | 725 | 0,73 | 0,28 | 700  |
| 26            | 320    | 160    | 0,5  | 666 | 0,67 | 0,32 | 600  |
| 27            | 252    | 160    | 0,63 | 666 | 0,67 | 0,25 | 600  |
| 28            | 229    | 103    | 0,45 | 370 | 0,37 | 0,23 | 0    |
| 29            | 221    | 89     | 0,4  | 338 | 0,34 | 0,22 | 0    |
| 30            | 243    | 155    | 0,64 | 629 | 0,63 | 0,24 | 600  |
| 31            | 338    | 153    | 0,45 | 703 | 0,70 | 0,34 | 700  |
| 32            | 231    | 171    | 0,74 | 629 | 0,63 | 0,23 | 600  |
| 33            | 254    | 125    | 0,49 | 444 | 0,44 | 0,25 | 400  |
| 34            | 241    | 137    | 0,57 | 518 | 0,52 | 0,24 | 500  |
| 35            | 221    | 121    | 0,55 | 518 | 0,52 | 0,22 | 0    |
| 36            | 251    | 90     | 0,36 | 387 | 0,39 | 0,25 | 0    |
| Сред          | 229    | 115    | 0,51 | 470 | 0,47 | 0,23 | —    |
| Макс          | 338,41 | 171,31 | 0,81 | 725 | 0,73 | 0,34 | —    |
| Мин           | 120,92 | 48     | 0,36 | 222 | 0,22 | 0,12 | —    |
| Сумм $Q_{БК}$ |        |        |      |     |      |      | 6400 |

Данные таблицы 3.4 показывают, что значения коэффициентов загрузки трансформаторов по активной мощности в период максимальной нагрузки изменяются в пределах от 0,3 до 0,98, а в среднем за полные сутки – от 0,21 до 0,58.

Данные таблицы 3.5 показывают, что значения коэффициентов загрузки трансформаторов по полной мощности в период максимальной нагрузки изменяются от 0,37 до 1,22, а в среднем за полные сутки от 0,24 до 0,67, при этом выявлена систематическая перегрузка трансформаторов ТР7, ТР13, ТР22, ТР23, ТР25; ТР26; ТР27; ТР30; ТР31; ТР32; ТР33; ТР34 в периоды максимальных нагрузок.

Перегрузка возникает из-за значительных реактивных нагрузок трансформаторов (таблица 3.6) – от 222 до 725 кВАр. Поэтому, чтобы устранить перегрузочные режимы, требуется установка устройств компенсации реактивной мощности на стороне низшего напряжения трансформаторов.

Статистические параметры характеристик реактивной мощности нагрузки в соответствии с (3.10) за сутки трансформаторов Пряд-ткац. фабрики и рекомендуемые для установки мощности  $Q_{БК}$  [77-82] даны в таблице 3.6.

$$Q_{\text{макс.}i} > Q_{\text{БК.}i};$$

$$Q_{\text{БК.}i} > Q_{\text{макс.}i} - \sqrt{(S_{\text{ном.тр.}i})^2 - (P_{\text{макс.тр.}i})^2}, \quad (3.10)$$

где  $S_{\text{ном.}i}=1000$  кВА – номинальная мощность трансформатора  $i$ ;  $P_{\text{макс.}i}$  и  $Q_{\text{макс.}i}$  – максимальные величины мощности трансформатора.

С помощью (3.10):

1. Если значение  $\left( Q_{\text{макс.}i} - \sqrt{(S_{\text{ном.тр.}i})^2 - (P_{\text{макс.тр.}i})^2} \right)$  имеет отрицательное значение, то номинальная мощность компенсирующих устройств батарей конденсаторов ( $Q_{\text{БК.}i}=0$ ).

2. Если значение  $\left( Q_{\text{макс.}i} - \sqrt{(S_{\text{ном.тр.}i})^2 - (P_{\text{макс.тр.}i})^2} \right)$  имеет положительное значение, то номинальная мощность компенсирующих устройств батарей конденсаторов  $Q_{\text{БК.}i} = (400; 500; 600; 700)$  кВАр.

Данные таблицы 3.5 показывают, что ТР25 имеет самую значительную перегрузку ( $K_{зг.макс}=1,22$ ), поэтому рассчитаем для данного трансформатора максимальное почасовое значение  $Q_{БК}$  с помощью (3.10) – таблица 3.7.

Таблица 3.7 – Результаты расчета мощности компенсирующих устройств батарей конденсаторов для трансформатора 25

| Время, ч | $S_{25ср}$ , кВА | $Q_{25ср}$ , кВАр | $S_{25комп}$ , кВА | $Q_{БК}$ , кВАр | $P_{25ср}$ , кВт | $K_{зг.ком}$ | $K_{зг.Р}$ |
|----------|------------------|-------------------|--------------------|-----------------|------------------|--------------|------------|
| 1        | 25               | 25                | 25                 | 0               | 50               | 0,025        | 0,05       |
| 2        | 25               | 25                | 25                 | 0               | 50               | 0,025        | 0,05       |
| 3        | 250              | 175               | 175                | 0               | 200              | 0,175        | 0,2        |
| 4        | 500              | 300               | 300                | 0               | 400              | 0,3          | 0,4        |
| 5        | 600              | 350               | 350                | 0               | 500              | 0,35         | 0,5        |
| 6        | 600              | 350               | 350                | 0               | 500              | 0,35         | 0,5        |
| 7        | 550              | 325               | 325                | 0               | 400              | 0,325        | 0,4        |
| 8        | 500              | 300               | 300                | 0               | 400              | 0,3          | 0,4        |
| 9        | 700              | 400               | 550                | -400            | 600              | 0,55         | 0,6        |
| 10       | 1000             | 600               | 800                | -600            | 800              | 0,8          | 0,8        |
| 11       | 1200             | 700               | 1000               | -700            | 1000             | 1            | 1          |
| 12       | 1050             | 425               | 950                | -400            | 900              | 0,95         | 0,9        |
| 13       | 775              | 300               | 775                | 0               | 700              | 0,775        | 0,7        |
| 14       | 700              | 300               | 700                | 0               | 600              | 0,7          | 0,6        |
| 15       | 700              | 300               | 700                | 0               | 600              | 0,7          | 0,6        |
| 16       | 775              | 325               | 775                | 0               | 700              | 0,775        | 0,7        |
| 17       | 900              | 375               | 900                | 0               | 800              | 0,9          | 0,8        |
| 18       | 825              | 325               | 825                | 0               | 750              | 0,825        | 0,75       |
| 19       | 575              | 225               | 575                | 0               | 500              | 0,575        | 0,5        |
| 20       | 225              | 50                | 225                | 0               | 200              | 0,225        | 0,2        |
| 21       | 100              | 25                | 100                | 0               | 100              | 0,1          | 0,1        |
| 22       | 225              | 100               | 225                | 0               | 200              | 0,225        | 0,2        |
| 23       | 350              | 175               | 350                | 0               | 300              | 0,35         | 0,3        |
| 24       | 350              | 175               | 350                | 0               | 300              | 0,35         | 0,3        |

Данные таблицы 3.7 показывают, что максимальное значение  $Q_{БК}=700$  кВАр. На рисунке 3.8 представлены графики полной мощности нагрузки ТР25 до и после установки КУ [83].

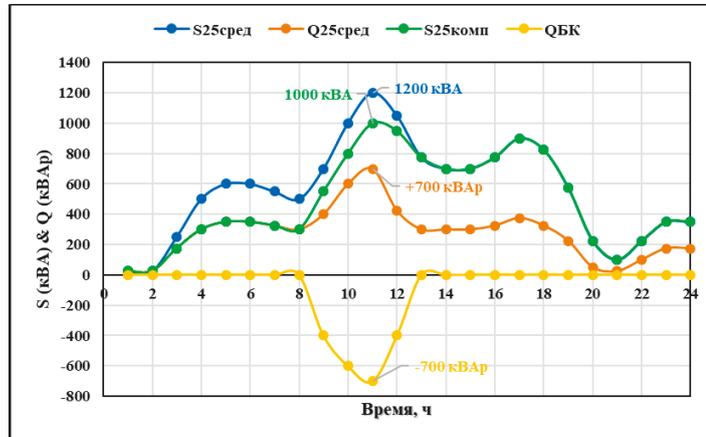


Рисунок 3.8 – Графики нагрузки трансформатора 25 до и после компенсации реактивной мощности

Конструктивно батареи конденсаторов содержат по две ступени мощности – 400 кВАр и 300 кВАр, которые подключаются в периоды максимальной нагрузки. В этом случае максимальная полная мощность нагрузки уменьшается с  $S_{25сред}=1200$  кВА до  $S_{25комп}=1000$  кВА. При этом значение коэффициента загрузки определяется величиной активной мощности. С помощью данных таблицы 3.7 на рисунке 3.9 показаны графики коэффициентов загрузки ТР25 по активной мощности и по полной мощности после компенсации.

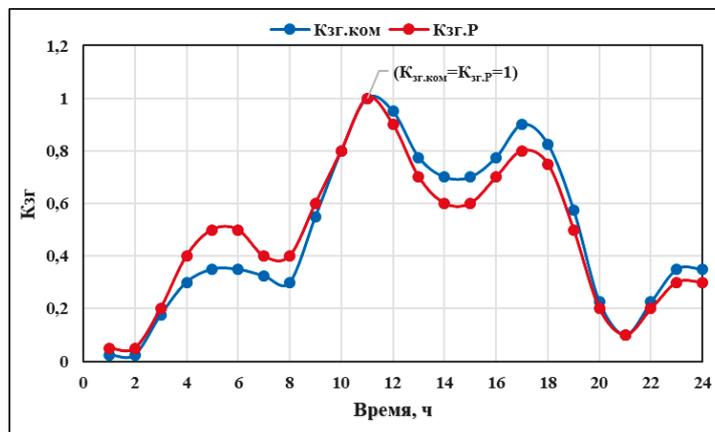


Рисунок 3.9 – Графические зависимости суточных значений загрузки по активной и полной мощности трансформатора 25 с учетом КУ

Графические зависимости (рисунок 3.9) иллюстрируют примерное равенство загрузок трансформаторов по  $P$ ,  $S$  при установке батарей конденсаторов, в т.ч. при имеющемся максимуме.

Поэтому для проведения дальнейшего анализа и исследований параметров графиков нагрузок трансформаторов целесообразно использовать в качестве базовых графики нагрузок активной мощности и статистические характеристики данных графиков.

С помощью (2.6) рассчитаем коэффициенты корреляции между параметрами суточного графика активной мощности нагрузок трансформаторов (рисунок 3.6) и суммарного графика активной мощности (рисунок 3.5) для ТР1 по выражениям

$$\begin{aligned} (R_{\text{кор.сред}})_{\text{тр.}i} &= \frac{\sum_{i=1}^{24} (P_{\text{сут.}i} - P_{\text{сут.сред}})(P_{\text{сумм.}i} - P_{\text{сумм.сред}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{24} (P_{\text{сут.}i} - P_{\text{сут.сред}})^2 \cdot \sum_{i=1}^{24} (P_{\text{сумм.}i} - P_{\text{сумм.сред}})^2}} = 0,80; \\ (R_{\text{кор.макс}})_{\text{тр.}i} &= \frac{\sum_{i=1}^{24} (P_{\text{сут.}i} - P_{\text{сут.макс}})(P_{\text{сумм.}i} - P_{\text{сумм.макс}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{24} (P_{\text{сут.}i} - P_{\text{сут.макс}})^2 \cdot \sum_{i=1}^{24} (P_{\text{сумм.}i} - P_{\text{сумм.макс}})^2}} = 0,94; \\ (R_{\text{кор.мин}})_{\text{тр.}i} &= \frac{\sum_{i=1}^{24} (P_{\text{сут.}i} - P_{\text{сут.мин}})(P_{\text{сумм.}i} - P_{\text{сумм.мин}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{24} (P_{\text{сут.}i} - P_{\text{сут.мин}})^2 \cdot \sum_{i=1}^{24} (P_{\text{сумм.}i} - P_{\text{сумм.мин}})^2}} = 0,60. \end{aligned} \quad (3.11)$$

Результаты расчетов значений коэффициентов корреляции, соответствующих параметрам графиков нагрузок для каждого трансформатора, показаны в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Значения коэффициентов корреляции между параметрами суточных графиков активной мощности нагрузок трансформаторов и суммарного графика активной мощности нагрузок Прядильно-ткацкой фабрики

| ТР   | $R_{кор.сред}$   | $R_{кор.макс}$ | $R_{кор.мин}$ | ТР | $R_{кор.сред}$ | $R_{кор.макс}$ | $R_{кор.мин}$ |
|------|--|----------------|---------------|----|----------------|----------------|---------------|
| 1    | 0,80   | 0,94           | 0,60          | 19 | 0,75           | 0,92           | 0,44          |
| 2    | 0,80   | 0,95           | 0,54          | 20 | 0,63           | 0,89           | 0,21          |
| 3    | 0,79   | 0,90           | 0,55          | 21 | 0,79           | 0,96           | 0,40          |
| 4    | 0,80   | 0,96           | 0,47          | 22 | 0,74           | 0,92           | 0,48          |
| 5    | 0,71   | 0,95           | 0,19          | 23 | 0,72           | 0,92           | 0,34          |
| 6    | 0,81   | 0,96           | 0,43          | 24 | 0,76           | 0,97           | 0,35          |
| 7    | 0,80   | 0,97           | 0,49          | 25 | 0,63           | 0,95           | 0,13          |
| 8    | 0,82   | 0,96           | 0,54          | 26 | 0,72           | 0,95           | 0,20          |
| 9    | 0,75   | 0,95           | 0,33          | 27 | 0,75           | 0,95           | 0,35          |
| 10   | 0,77   | 0,92           | 0,48          | 28 | 0,66           | 0,97           | 0,28          |
| 11   | 0,57   | 0,98           | 0,19          | 29 | 0,53           | 0,92           | 0,01          |
| 12   | 0,74   | 0,97           | 0,44          | 30 | 0,73           | 0,94           | 0,27          |
| 13   | 0,71   | 0,98           | 0,24          | 31 | 0,72           | 0,98           | 0,25          |
| 14   | 0,78   | 0,92           | 0,46          | 32 | 0,62           | 0,93           | 0,01          |
| 15   | 0,80   | 0,97           | 0,45          | 33 | 0,55           | 0,95           | -0,02         |
| 16   | 0,82   | 0,97           | 0,55          | 34 | 0,70           | 0,92           | 0,29          |
| 17   | 0,53   | 0,95           | -0,08         | 35 | 0,69           | 0,90           | 0,27          |
| 18   | 0,54   | 0,87           | -0,08         | 36 | 0,53           | 0,98           | 0,13          |
| Сред | $R_{кор.сред..} = 0,84; R_{кор.макс..} = 0,97; R_{кор.мин..} = 0,64$ |                |               |    |                |                |               |

В результате проведённого анализа корреляционных связей между параметрами графиков активной мощности нагрузок трансформаторов (таблица 3.8) и графиком суммарной активной мощности нагрузок Пряд-ткац. фабрики установлено, что коэффициенты корреляции в периоды максимальной нагрузки равны примерно 1, а в периоды минимальной нагрузки находятся в интервале  $[-0,08 \div 0,6]$ .

Поэтому все значения коэффициентов корреляции положительны и графики мощности нагрузки приобретают современную одинаковую тенденцию, имеется ввиду, что при положительной корреляции (увеличение или уменьшение) параметров суточных графиков активной мощности нагрузок трансформаторов, наблюдается данная закономерность параметров суммарного графика активной мощности нагрузок Пряд-ткац. фабрики (взаимосвязи типа «увеличение-увеличение» или «уменьшение-уменьшение»).

### 3.3. Особенности применения эмпирических уравнений для описания графических зависимостей мощности нагрузок от времени

Процесс подбора эмпирических уравнений для описания графических зависимостей мощности нагрузок от времени требует проверить возможность его применения по «методу средних». Применение данного метода заключается [84] в следующем:

1. определить разности между функциями  $f_{исх}(x)$  и  $\Phi(x)$  для проверки зависимости

$$M_R = f_{исх}(x) - \Phi(x), \quad (3.12)$$

где  $f_{исх}(x)$  – исходная функция;  $\Phi(x)$  – аппроксимирующая функция;

2. выбрать вид уравнений;

3. определить среднюю квадратическую погрешность – метод наименьших квадратов (МНК) для проверки степени приближения;

4. использовать тригонометрические функции (зависимости косинуса от времени) для аппроксимации суточных графиков нагрузки

$$A \cos(\omega \cdot t + j_0) = A \cos\left(\frac{2\pi \cdot t}{T} + j_0\right); \quad (3.13)$$

$$j_0 = 2\pi \cdot t_0 \cdot \omega, \quad (3.14)$$

где  $A$  – амплитуда;  $t$  – текущее время, ч;  $\left(\omega \cdot t + j_0 = \frac{2\pi \cdot t}{T} + j_0\right)$  – аргумент косинуса;

$T$  – период колебания, ч;  $\omega = \left(\frac{2\pi}{T}\right)$  – угловая частота, ч<sup>-1</sup>;  $j_0$  – постоянная величина начальной фазы при  $t=0$ ;  $t_0$  – время наступления начальной фазы, ч.

### 3.4. Выбор вида аппроксимирующей функции суточных графиков активных мощностей нагрузок трансформаторов Прядельно-ткацкой фабрики (первое приближение)

#### 3.4.1. Виды функций аппроксимации (первое приближение)

Функции аппроксимации в первом приближении характеризуются [84-88]:

1. наиболее приближена к исходной функции суточного графика нагрузки функция косинуса с периодом  $T^{[1]} = 24$  ч;
2. аппроксимирующая функция не может быть отрицательной;
3. среднее и максимальное значения аппроксимирующей функции должны приближаться к среднему и максимальному значению исходного графика;
4. максимальное значение исходного и аппроксимированного графика должно совпадать по времени;
5. в первом приближении, график аппроксимирующей функции активной нагрузки имеет вид

$$\Phi^{[1]}(t) = B_p^{[1]} - A_p^{[1]} \cos(\omega^{[1]}t) = B_p^{[1]} - A \cos\left(\frac{2\pi}{T^{[1]}}t\right); \quad (3.15)$$

$$B_p^{[1]} \approx M_p^{[1]}; \quad (3.16)$$

$$\omega^{[1]} = \frac{2\pi}{T^{[1]}} = \frac{6}{24} \approx 0,25 \text{ ч}^{-1}; \quad (3.17)$$

$$A_p^{[1]} \approx A_p = 0,5(P_{\text{макс}} - P_{\text{мин}}), \quad (3.18)$$

где  $M_p = P_{\text{сред}}$  – среднее за сутки значение активной мощности нагрузки исходного графика, полученное по статистическим данным;  $M_p^{[1]}$  – среднее за сутки значение активной мощности нагрузки графика аппроксимации в первом приближении;  $\omega^{[1]}$  – угловая частота в первом приближении;  $A_p^{[1]}$  – амплитуда косинуса в первом приближении;  $P_{\text{макс}}$  и  $P_{\text{мин}}$  – максимальное и минимальное значение активной нагрузки суточного графика.

### 3.4.2. Исследование и анализ исходных графиков активных нагрузок и аппроксимированных графических зависимостей активной мощности нагрузок Прядильно-ткацкой фабрики (первое приближение)

Статистические значения исходных суточных графиков активной мощности нагрузок трансформаторов Пряд-ткац. фабрики представлены в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Статистические параметры исходных суточных графиков активной мощности нагрузок трансформаторов Прядильно-ткацкой фабрики

| ТР | $M_P$ , кВт | $P_{\max}$ , кВт | $P_{\min}$ , кВт | $0,5(P_{\max} - P_{\min})$ | $\sigma$ , кВт | $\gamma$ | $K_{\max}$ |
|----|-------------|------------------|------------------|----------------------------|----------------|----------|------------|
| 1  | 466         | 770              | 174              | 298                        | 208            | 0,44     | 1,65       |
| 2  | 409         | 730              | 140              | 295                        | 231            | 0,56     | 1,78       |
| 3  | 458         | 810              | 150              | 330                        | 197            | 0,43     | 1,77       |
| 4  | 350         | 550              | 120              | 215                        | 138            | 0,39     | 1,57       |
| 5  | 329         | 530              | 200              | 165                        | 119            | 0,36     | 1,61       |
| 6  | 404         | 630              | 150              | 240                        | 187            | 0,46     | 1,56       |
| 7  | 520         | 900              | 250              | 325                        | 210            | 0,40     | 1,73       |
| 8  | 427         | 700              | 150              | 275                        | 213            | 0,50     | 1,64       |
| 9  | 321         | 600              | 150              | 225                        | 173            | 0,53     | 1,87       |
| 10 | 209         | 300              | 100              | 100                        | 73             | 0,35     | 1,44       |
| 11 | 310         | 600              | 100              | 250                        | 162            | 0,52     | 1,94       |
| 12 | 352         | 700              | 50               | 325                        | 211            | 0,60     | 1,99       |
| 13 | 425         | 800              | 200              | 300                        | 219            | 0,52     | 1,88       |
| 14 | 431         | 700              | 200              | 250                        | 151            | 0,35     | 1,62       |
| 15 | 333         | 700              | 100              | 300                        | 197            | 0,60     | 2,1        |
| 16 | 304         | 650              | 50               | 300                        | 233            | 0,77     | 2,14       |
| 17 | 374         | 800              | 50               | 375                        | 243            | 0,65     | 2,14       |
| 18 | 247         | 500              | 50               | 225                        | 128            | 0,52     | 2,02       |
| 19 | 267         | 500              | 100              | 200                        | 131            | 0,49     | 1,87       |
| 20 | 448         | 850              | 100              | 375                        | 203            | 0,45     | 1,9        |

|      |       |     |     |     |     |      |      |
|------|-------|-----|-----|-----|-----|------|------|
| 21   | 288   | 500 | 100 | 200 | 145 | 0,50 | 1,74 |
| 22   | 429   | 800 | 200 | 300 | 211 | 0,49 | 1,86 |
| 23   | 542   | 900 | 300 | 300 | 205 | 0,38 | 1,66 |
| 24   | 433   | 750 | 200 | 275 | 179 | 0,41 | 1,73 |
| 25   | 483   | 980 | 50  | 465 | 273 | 0,57 | 2,03 |
| 26   | 538   | 900 | 300 | 300 | 221 | 0,41 | 1,67 |
| 27   | 444   | 900 | 50  | 425 | 266 | 0,60 | 2,03 |
| 28   | 424   | 800 | 50  | 375 | 233 | 0,55 | 1,89 |
| 29   | 419   | 750 | 50  | 350 | 233 | 0,55 | 1,79 |
| 30   | 415   | 850 | 50  | 400 | 241 | 0,58 | 2,05 |
| 31   | 575   | 950 | 400 | 275 | 225 | 0,39 | 1,65 |
| 32   | 376   | 850 | 50  | 400 | 247 | 0,65 | 2,26 |
| 33   | 467   | 950 | 50  | 450 | 256 | 0,55 | 2,03 |
| 34   | 430   | 920 | 50  | 435 | 251 | 0,58 | 2,14 |
| 35   | 406   | 750 | 50  | 350 | 236 | 0,58 | 1,85 |
| 36   | 464   | 860 | 100 | 380 | 230 | 0,49 | 1,85 |
| Сред | 403   | 743 | 129 | 307 | 202 | 0,51 | 1,85 |
| Сумм | 14517 |     |     |     |     |      |      |

Среднеквадратическое отклонение активной мощности нагрузки составляет 73→273 кВт (в среднем 202 кВт). Вариация исходных графиков активной нагрузки изменяется в пределах от 0,35 →0,77 (в среднем 0,51). Коэффициент максимума 1,44→2,26 (в среднем 1,85). В таблице 3.10 приведены:

1. Аргументы аппроксимирующих функций [89, 90] суточных активных нагрузок трансформаторов в первом приближении, то есть при периоде  $T^{[1]}=24$  ч

$$\Phi^{[1]}(t) = B_p^{[1]} - A_p^{[1]} \cdot \cos(0,25t). \quad (3.19)$$

2. Средние значения разностей

$$M_R^{[1]} = f_{\text{исх}}(t) - \Phi^{[1]}(t);$$

$$M_R^{[1]} \% = \frac{M_R^{[1]}}{M_P^{[1]}}. \quad (3.20)$$

### 3. Значение среднеквадратического отклонения разностей

$$\delta_R^{[1]} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{24} \left( (M_R^{[1]})_i - (M_R^{[1]})_{\text{сред}} \right)^2}{24}};$$

$$\delta_R^{[1]} \% = \frac{\delta_R^{[1]}}{M_P^{[1]}}. \quad (3.21)$$

Рассчитаем аргументы функции аппроксимации в первом приближении суточных графиков активной мощности нагрузок ТР 11/0,4 кВ Пряд-ткац. фабрики ТР25 (с наибольшим значением коэффициента загрузки  $K_{з2}=0,98$ ):

#### 1. Аппроксимирующие функции

$$\left( \Phi^{[1]}(t) \right)_{\text{тр25}} = 460 - 440 \cos(0,25t);$$

$$(M_P)_{\text{тр25}} = \frac{11592}{24} = 483 \text{ кВт} \Rightarrow (M_P^{[1]})_{\text{тр25}} \approx 480 \text{ кВт} \Rightarrow (B_{P1}^{[1]})_{\text{тр25}} \approx 460 \text{ кВт}; \quad (3.22)$$

$$(A_P)_{\text{тр25}} = \frac{980-50}{2} = 465 \text{ кВт} \Rightarrow (A_{P1}^{[1]})_{\text{тр25}} = \frac{P_{\text{макс1}}^{[1]} - P_{\text{мин1}}^{[1]}}{2} \approx \frac{897-35}{2} \approx 440 \text{ кВт}.$$

#### 2. Средние значения разностей

$$\left( M_R^{[1]} \right)_{\text{тр25}} = \left( f_{\text{исх}}(t) \right)_{\text{тр25}} - \left( \Phi^{[1]}(t) \right)_{\text{тр25}} = \frac{-46}{24} = -2;$$

$$\left( M_R^{[1]} \% \right)_{\text{тр25}} = -\frac{2}{480} \times 100 = -0,42\%. \quad (3.23)$$

#### 3. Значения среднеквадратического отклонения разностей

$$\left( \delta_R^{[1]} \right)_{\text{тр25}} = \sqrt{\frac{599547}{24}} = 158 \text{ кВт} \Rightarrow \left( \delta_R^{[1]} \% \right)_{\text{тр25}} = \frac{158}{480} \times 100 = 32,73\%. \quad (3.24)$$

Результаты вычислений аргументов функции аппроксимации и их погрешности в первом приближении активной мощности представлены в таблице 3.10.

Таблица 3.10 – Аргументы функции аппроксимации и их погрешности в первом приближении суточных графиков активной мощности нагрузок Прядильно-ткацкой фабрики

| ТР | Аргументы функция $\phi^{[j]}(t)$<br>аппроксимации в первом приближении |             | $M_R^{[j]}$ ,<br>кВт | $M_R^{[j]}$ % | $\delta_R^{[j]}$ , кВт | $\delta_R^{[j]}$ % |
|----|---|-------------|----------------------|---------------|------------------------|--------------------|
|    | $B_P^{[j]}$   | $A_P^{[j]}$ |                      |               |                        |                    |
| 1  | 460   | 300         | 4                    | 0,91          | 104                    | 22,41              |
| 2  | 400   | 300         | 5                    | 1,20          | 85                     | 20,50              |
| 3  | 450   | 300         | 3                    | 0,75          | 89                     | 19,37              |
| 4  | 350   | 200         | 7                    | 2,14          | 54                     | 15,48              |
| 5  | 320   | 150         | -3                   | -0,76         | 49                     | 15,00              |
| 6  | 400   | 250         | 8                    | 2,10          | 39                     | 9,65               |
| 7  | 500   | 300         | -5                   | -0,89         | 76                     | 14,72              |
| 8  | 410   | 300         | -3                   | -0,69         | 88                     | 20,61              |
| 9  | 310   | 200         | -1                   | -0,44         | 83                     | 25,85              |
| 10 | 200   | 100         | -4                   | -1,93         | 39                     | 18,62              |
| 11 | 300   | 200         | 0                    | 0,09          | 147                    | 47,41              |
| 12 | 340   | 250         | 0                    | -0,08         | 119                    | 33,74              |
| 13 | 410   | 300         | -1                   | -0,20         | 123                    | 29,04              |
| 14 | 420   | 250         | 1                    | 0,12          | 77                     | 17,76              |
| 15 | 320   | 250         | -2                   | -0,46         | 104                    | 31,16              |
| 16 | 290   | 300         | 0                    | -0,01         | 73                     | 24,15              |
| 17 | 360   | 300         | 1                    | 0,33          | 233                    | 62,49              |
| 18 | 240   | 150         | 1                    | 0,50          | 79                     | 32,05              |
| 19 | 260   | 200         | 3                    | 1,04          | 65                     | 24,32              |
| 20 | 440   | 300         | 6                    | 1,39          | 130                    | 28,94              |
| 21 | 280   | 190         | 1                    | 0,51          | 61                     | 21,05              |
| 22 | 420   | 300         | 5                    | 1,16          | 108                    | 25,06              |
| 23 | 530   | 300         | 2                    | 0,46          | 109                    | 20,15              |
| 24 | 420   | 270         | -1                   | -0,14         | 117                    | 27,06              |

|      |       |       |    |       |     |       |
|------|-------|-------|----|-------|-----|-------|
| 25   | 460   | 440   | -2 | -0,42 | 158 | 32,73 |
| 26   | 525   | 300   | 2  | 0,31  | 73  | 13,61 |
| 27   | 430   | 400   | 5  | 1,15  | 106 | 23,78 |
| 28   | 410   | 350   | 4  | 0,85  | 182 | 43,01 |
| 29   | 405   | 350   | 3  | 0,66  | 230 | 55,02 |
| 30   | 400   | 400   | 4  | 1,03  | 126 | 30,28 |
| 31   | 560   | 300   | -1 | -0,15 | 125 | 21,80 |
| 32   | 365   | 400   | 7  | 1,80  | 174 | 46,06 |
| 33   | 450   | 450   | 4  | 0,80  | 299 | 63,94 |
| 34   | 415   | 400   | 4  | 0,90  | 215 | 49,94 |
| 35   | 390   | 350   | 0  | 0,06  | 165 | 40,62 |
| 36   | 450   | 380   | 4  | 0,90  | 258 | 55,54 |
| Сумм | 14090 | 10480 | 62 |       |     |       |

Данные таблицы 3.10 показывают, что средние значения разностей исходного графика и аппроксимирующей функции составляют доли процента от среднего значения активной нагрузки за сутки для каждого трансформатора. На рисунке 3.10 показаны исходный график активной нагрузки и его приближённая аппроксимация.

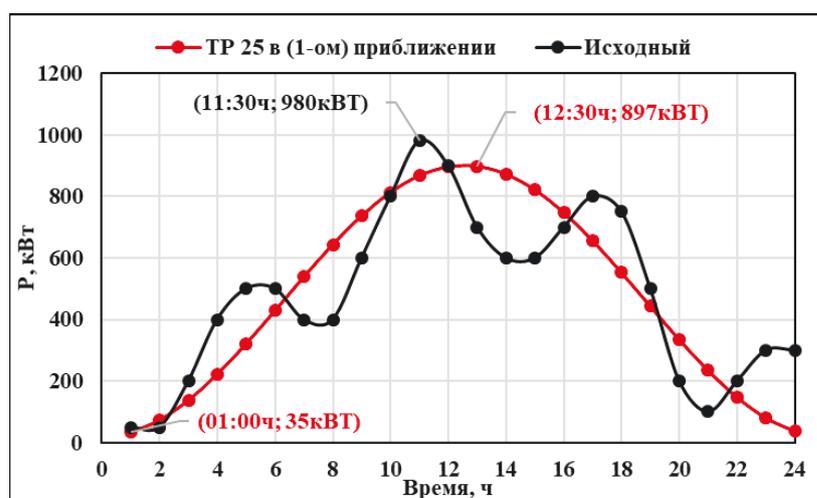


Рисунок 3.10 – Исходный график активной нагрузки трансформатора 25 и его приближённая аппроксимация  $460-440\cos(0,25t)$

Рисунок 3.10 показывает, что время максимума исходного графика – 11:30 ч, время максимума аппроксимирующей функции – 12:30 ч.

Значения среднеквадратической погрешности для нагрузок 28 трансформаторов превышают 20 %, что указывает на необходимость более точной аппроксимации. В таблице 3.11 приведены статистические характеристики аппроксимированных графиков активной нагрузки трансформаторов фабрики. Определим параметры графиков для ТР25

$$\begin{aligned} (M_P^{[1]})_{\text{тр25}} &= \frac{11529}{24} = 480 \text{ кВт}; & (P_{\text{макс}}^{[1]})_{\text{тр25}} &= 897 \text{ кВт}; \\ (P_{\text{мин}}^{[1]})_{\text{тр25}} &= 35 \text{ кВт}; & (\sigma_P^{[1]})_{\text{тр25}} &= \sqrt{\frac{2461127}{24}} = 320 \text{ кВт}; & (3.25) \\ (\gamma^{[1]})_{\text{тр25}} &= \frac{320}{480} = 0,67; & (K_{\text{макс}}^{[1]})_{\text{тр25}} &= \frac{897}{480} = 1,87. \end{aligned}$$

Результаты вычислений даны в таблице 3.11.

Таблица 3.11 – Статистические параметры суточных графиков активной мощности нагрузок трансформаторов 11/0,4 кВ Прядильно-ткацкой фабрики в первом приближении

| ТР | $M_P^{[1]}$ , кВт | $P_{\text{макс}}$ , кВт | $P_{\text{мин}}$ , кВт | $\sigma$ , кВт | $\gamma$ | $K_{\text{макс}}$ |
|----|-------------------|-------------------------|------------------------|----------------|----------|-------------------|
| 1  | 470               | 659                     | 266                    | 140            | 0,3      | 1,4               |
| 2  | 414               | 698                     | 109                    | 211            | 0,51     | 1,69              |
| 3  | 461               | 699                     | 208                    | 176            | 0,38     | 1,51              |
| 4  | 357               | 499                     | 205                    | 106            | 0,3      | 1,40              |
| 5  | 326               | 469                     | 175                    | 106            | 0,33     | 1,43              |
| 6  | 412               | 649                     | 158                    | 176            | 0,43     | 1,57              |
| 7  | 515               | 798                     | 209                    | 211            | 0,41     | 1,55              |
| 8  | 424               | 708                     | 119                    | 211            | 0,5      | 1,67              |
| 9  | 320               | 509                     | 116                    | 141            | 0,44     | 1,59              |
| 10 | 205               | 299                     | 103                    | 70             | 0,34     | 1,46              |

## Продолжение таблицы 3.11

|      |       |     |     |     |      |      |
|------|-------|-----|-----|-----|------|------|
| 11   | 310   | 499 | 106 | 141 | 0,45 | 1,61 |
| 12   | 352   | 589 | 98  | 176 | 0,5  | 1,67 |
| 13   | 424   | 708 | 119 | 211 | 0,5  | 1,67 |
| 14   | 432   | 669 | 178 | 176 | 0,41 | 1,55 |
| 15   | 332   | 569 | 78  | 176 | 0,53 | 1,71 |
| 16   | 304   | 588 | -1  | 211 | 0,69 | 1,93 |
| 17   | 375   | 658 | 69  | 211 | 0,56 | 1,76 |
| 18   | 248   | 389 | 95  | 106 | 0,43 | 1,57 |
| 19   | 270   | 459 | 66  | 141 | 0,52 | 1,70 |
| 20   | 454   | 738 | 149 | 211 | 0,46 | 1,63 |
| 21   | 289   | 469 | 96  | 134 | 0,46 | 1,62 |
| 22   | 434   | 718 | 129 | 211 | 0,49 | 1,65 |
| 23   | 544   | 828 | 239 | 211 | 0,39 | 1,52 |
| 24   | 432   | 688 | 158 | 190 | 0,44 | 1,59 |
| 25   | 480   | 897 | 35  | 320 | 0,67 | 1,87 |
| 26   | 540   | 823 | 234 | 211 | 0,39 | 1,53 |
| 27   | 449   | 828 | 42  | 281 | 0,63 | 1,84 |
| 28   | 428   | 758 | 71  | 246 | 0,57 | 1,77 |
| 29   | 422   | 753 | 66  | 246 | 0,58 | 1,78 |
| 30   | 419   | 798 | 12  | 281 | 0,67 | 1,9  |
| 31   | 574   | 858 | 269 | 211 | 0,37 | 1,49 |
| 32   | 383   | 763 | -23 | 281 | 0,73 | 1,99 |
| 33   | 471   | 897 | 14  | 317 | 0,67 | 1,9  |
| 34   | 434   | 813 | 27  | 281 | 0,65 | 1,87 |
| 35   | 406   | 738 | 51  | 246 | 0,61 | 1,82 |
| 36   | 468   | 828 | 82  | 267 | 0,57 | 1,77 |
| Сумм | 14579 |     |     |     |      |      |
| Сред | 405   |     |     |     |      |      |

В таблице 3.12 представлены характеристики исходных суммарных графиков активной мощности нагрузки трансформаторов Пряд-ткац. фабрики и суммы аппроксимирующих функций.

Таблица 3.12 – Статистические параметры исходных графиков и функций аппроксимации в первом приближении суточных графиков активной мощности нагрузок Прядельно-ткацкой фабрики

| График          | $M_{P.сумм}, \text{кВт}$ | $P_{макс.сумм}, \text{кВт}$ | $\tau, \text{ч}$ | $\sigma_{сумм}, \text{кВт}$ | $\gamma_{сред}$ | $K_{макс.сред}$ |
|-----------------|--------------------------|-----------------------------|------------------|-----------------------------|-----------------|-----------------|
| Исходный        | 14517                    | 23225                       | 14:30 ч          | 7279                        | 0,51            | 1,85            |
| Аппроксимир [1] | 14579                    | 24508                       | 12:30 ч          | 7232                        | 0,49            | 1,67            |

В соответствии с (3.15) функция аппроксимации суммарного графика нагрузки фабрики

$$B_P^{[1]}_{\Sigma} - A_P^{[1]}_{\Sigma} \cos(0,25t) = 14090 - 10480 \cos(0,25t). \quad (3.26)$$

На рисунке 3.11 показаны суммарный исходный график активной мощности нагрузок Пряд-ткац. фабрики и аппроксимированный в первом приближении.

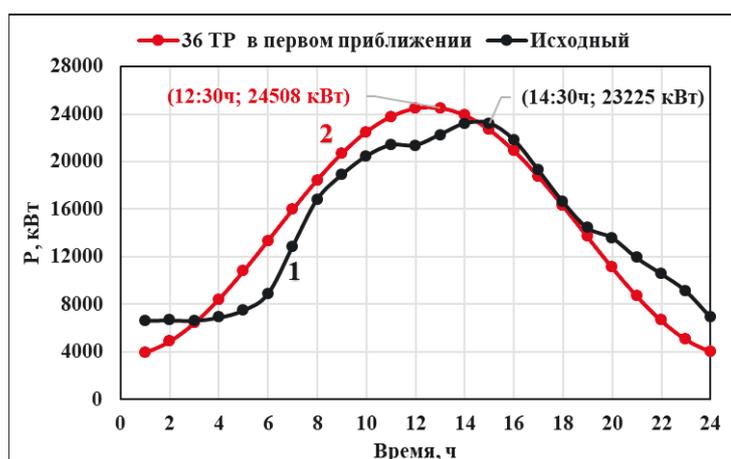


Рисунок 3.11 – Исходный график активной нагрузки и его первая приближённая

аппроксимация:  $\Phi^{[1]}(t)_{сумм} = 14090 - 10480 \cos(0,25t)$

На рисунке 3.11 показано:

график 1 – суточное исходное изменение активной мощности для 36 трансформаторов Прядильно-ткацкой фабрики;

график 2 – аппроксимация графика суммарной суточной активной мощности для 36 трансформаторов в первом приближении, его функция  $14090-10480 \cos(0,25t)$ . Данные таблицы 3.12 и рисунка 3.11 показывают, что при практическом совпадении средних значений графиков, наблюдается значительная разница в минимальном и максимальном значениях. Максимальная нагрузка исходного графика фиксируется в 14:30 ч, а аппроксимированного – в 12:30 ч, поэтому требуется уточнение аппроксимации.

### 3.5. Выбор вида аппроксимирующей функции суточных графиков активных мощностей нагрузок трансформаторов Прядильно-ткацкой фабрики (второе приближение)

#### 3.5.1. Виды функций аппроксимации (второе приближение)

Функция аппроксимации во втором приближении состоит из двух гармонических функций:

1. первая с периодом  $T_1^{[2]} = 24$  ч ( $\omega_1^{[2]} = 0,25$ );
2. вторая с периодом  $T_2^{[2]} \approx 6$  ч ( $\omega_2^{[2]} = 1$ ).

Постоянная величина начальной фазы во втором приближении

$$j_0^{[2]} = 2\pi \cdot t_0 \cdot \omega^{[2]}. \quad (3.27)$$

Аргументы аппроксимирующих функций суточных активных нагрузок трансформаторов во втором приближении [84, 91]

$$\begin{aligned} \Phi^{[2]}(t) &= B_{P1}^{[2]} - A_{P1}^{[2]} \cdot \cos(\omega_1^{[2]}t + j_{01}^{[2]}) + A_{P2}^{[2]} \cdot \cos(\omega_2^{[2]}t + j_{02}^{[2]}); \\ \Phi^{[2]}(t) &= B_{P1}^{[2]} - A_{P1}^{[2]} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T_1^{[2]}}t + j_{01}^{[2]}\right) + A_{P2}^{[2]} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T_2^{[2]}}t + j_{02}^{[2]}\right). \end{aligned} \quad (3.28)$$

### 3.5.2. Исследование и анализ исходных графиков активных нагрузок и аппроксимированных графических зависимостей активной мощности нагрузок Прядельно-ткацкой фабрики (второе приближение)

Рассчитаем аргументы функции аппроксимации во втором приближения графика нагрузки ТР25 в соответствие с (3.29).

$$\begin{aligned}
 1. \text{ Первая функция } & \left( B_{P1}^{[2]} - A_{P1}^{[2]} \cdot \cos(\omega_1^{[2]}t + j_{01}^{[2]}) = 480 - 300 \cos(0,25t) \right) \\
 & \left( B_{P1}^{[2]} \right)_{\text{ТР25}} \approx \left( M_{P1}^{[2]} \right)_{\text{ТР25}} = 480 \text{ кВт}; \\
 & \left( A_{P1}^{[2]} \right)_{\text{ТР25}} = \frac{P_{\text{макс1}}^{[2]} - P_{\text{мин1}}^{[2]}}{2} = \frac{780 - 190}{2} \approx 300 \text{ кВт}; \\
 & T_1^{[2]} = 24 \text{ ч} \Rightarrow \omega_1^{[2]} = \frac{2\pi}{24} = 0,25 \text{ ч}^{-1}; \\
 & j_0^{[1]} = 2\pi \cdot \omega_1^{[2]} t_{01} = 6 \times 0,25 \times 0 = 0.
 \end{aligned} \tag{3.29}$$

$$\begin{aligned}
 2. \text{ Вторая функция } & \left( A_{P2}^{[2]} \cdot \cos(\omega_2^{[2]}t + j_{02}^{[2]}) = -235 \cos(t - 8) \right) \\
 & \left( A_{P2}^{[2]} \right)_{\text{ТР25}} = \left( \frac{A_P}{2} \right)_{\text{ТР25}} = \frac{465}{2} \approx 235 \text{ кВт}; \\
 & T_2^{[2]} = 6 \text{ ч} \Rightarrow \omega_2^{[2]} = \frac{2\pi}{6} = 1 \text{ ч}^{-1}; \\
 & j_0^{[2]} = 2\pi \cdot \omega_2^{[2]} t_{02} = 6 \times 1 \times 1,3 = 8 \text{ ч}.
 \end{aligned} \tag{3.30}$$

3. Суммарная функция аппроксимации во втором приближении для ТР25

$$\begin{aligned}
 & \left( \Phi^{[2]}(t) \right)_{\text{ТР25}} = 480 - 300 \cos\left(\frac{2\pi}{24}t\right) - 235 \cos\left(\frac{2\pi}{6}t - 8\right); \\
 & \left( \Phi^{[2]}(t) \right)_{\text{ТР25}} = 480 - 300 \cos(0,25t) - 235 \cos(t - 8).
 \end{aligned} \tag{3.31}$$

На рисунке 3.12 представлены 4 графика, соответствующие (1-ой) и (2-ой) функциям аппроксимации, суммарной функции аппроксимации и исходный для трансформатора ТР25, имеющего наибольшую загрузку.

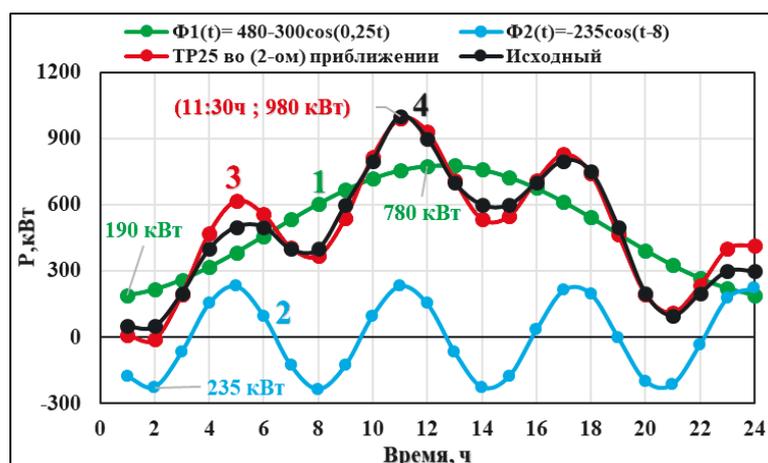


Рисунок 3.12 – Суточные исходные и аппроксимированные графики активной мощности нагрузок Прядильно-ткацкой фабрики во втором приближении для трансформатора 25

На рисунке 3.12:

график 1 – аппроксимация суточной активной мощности нагрузки TP25 во втором приближении, её первая функция  $480-300 \cos(0,25t)$ ;

график 2 – аппроксимация суточной активной мощности нагрузки TP25 во втором приближении, её вторая функция  $235 \cos(t-8)$ ;

график 3 – суммарная аппроксимация суточной активной мощности нагрузки TP25 во втором приближении, её функция  $480-300 \cos(0,25t)-235 \cos(t-8)$ ;

график 4 – суточное исходное изменение активной мощности нагрузки TP25. Зависимости показывают совпадение между исходными (график 4) и аппроксимированными (график 3) графиками, особенно, во время максимума (11:30 ч; 980 кВт).

В приложении А представлены графики активной мощности нагрузки трансформаторов Пряд-ткац. фабрики, исходные и аппроксимированные, которые показывают, что время наступления и значение максимальной мощности нагрузки приблизительно совпадают, как для TP25 (рисунок 3.12).

В таблице 3.13 представлены функции аппроксимации графиков активной мощности нагрузки трансформаторов во втором приближении.

Таблица 3.13 – Формулы уточнённые аппроксимации

| ТР | Аппроксимация во втором приближении |                     |
|----|-------------------------------------|---------------------|
|    | Первая функция                      | Вторая функция      |
| 1  | $460-200 \cos(0,25t)$               | $-120 \cos(t-4)$    |
| 2  | $400-300 \cos(0,25t)$               | $-70 \cos(5t/6-4)$  |
| 3  | $480-250 \cos(0,25t)$               | $-110 \cos(5t/6+5)$ |
| 4  | $345-150 \cos(0,25t)$               | $65 \cos(t+8)$      |
| 5  | $320-150 \cos(0,25t)$               | $70 \cos(t+5)$      |
| 6  | $300-250 \cos(0,25t)$               | $65 \cos(t+3)$      |
| 7  | $500-300 \cos(0,25t)$               | $110 \cos(4t/6+5)$  |
| 8  | $410-250 \cos(0,25t)$               | $100 \cos(5t/6+6)$  |
| 9  | $310-250 \cos(0,25t)$               | $150 \cos(5t/6+6)$  |
| 10 | $205-95 \cos(0,25t)$                | $15 \cos(t+4)$      |
| 11 | $330-220 \cos(0,25t-1)$             | $-130 \cos(t-5)$    |
| 12 | $345-250 \cos(0,25t-0,5)$           | $-130 \cos(t-5)$    |
| 13 | $400-300 \cos(0,25t)$               | $-170 \cos(t-6)$    |
| 14 | $420-200 \cos(0,25t)$               | $-100 \cos(t-5)$    |
| 15 | $320-300 \cos(0,25t-1)$             | $-110 \cos(t-6)$    |
| 16 | $285-300 \cos(0,25t)$               | $70 \cos(5t/3-3)$   |
| 17 | $460-200 \cos(0,25t-1)$             | $-165 \cos(t-6)$    |
| 18 | $360-300 \cos(0,25t+0,5)$           | $-140 \cos(t-10)$   |
| 19 | $240-150 \cos(0,25t+0,5)$           | $90 \cos(t+6)$      |
| 20 | $240-150 \cos(0,25t+0,5)$           | $-200 \cos(t-10)$   |
| 21 | $280-190 \cos(0,25t)$               | $-70 \cos(t+6)$     |
| 22 | $410-300 \cos(0,25t)$               | $-115 \cos(3t/2+6)$ |
| 23 | $530-200 \cos(0,25t)$               | $200 \cos(6t/5+6)$  |
| 24 | $420-230 \cos(0,25t-0,5)$           | $-115 \cos(t+6)$    |
| 25 | $480-300 \cos(0,25t)$               | $-235 \cos(t-8)$    |

|    |                           |                   |
|----|---------------------------|-------------------|
| 26 | $525-300 \cos(0,25t+0,5)$ | $-80 \cos(2t-6)$  |
| 27 | $425-300 \cos(0,25t)$     | $-200 \cos(t-8)$  |
| 28 | $415-270 \cos(0,25t-0,7)$ | $-160 \cos(t-4)$  |
| 29 | $415-300 \cos(0,25t-1)$   | $-110 \cos(t-4)$  |
| 30 | $470-320 \cos(0,25t-0,8)$ | $-70 \cos(t-4,5)$ |
| 31 | $630-300 \cos(0,25t-1)$   | $-140 \cos(t-6)$  |
| 32 | $390-300 \cos(0,25t)$     | $-210 \cos(t-6)$  |
| 33 | $450-300 \cos(0,25t-0,9)$ | $-225 \cos(t-6)$  |
| 34 | $410-300 \cos(0,25t-0,6)$ | $-230 \cos(t-6)$  |
| 35 | $395-300 \cos(0,25t-0,6)$ | $-100 \cos(t-8)$  |
| 36 | $450-300 \cos(0,25t-1)$   | $-150 \cos(t-6)$  |

По (3.31), используя статистические данные, рассчитаем параметры функции аппроксимации во втором приближении для ТР25

$$\begin{aligned} (M_P^{[2]})_{\text{тр}25} &= \frac{11590}{24} = 482 \text{ кВт}; \\ (\sigma_P^{[2]})_{\text{тр}25} &= \sqrt{\frac{1788700}{24}} = 273 \text{ кВт}. \end{aligned} \quad (3.32)$$

Результаты расчетов параметров остальных трансформаторов представлены в таблицах 3.14 и 3.15.

Таблица 3.14 – Статистические параметры исходных графиков активной мощности нагрузки и функции аппроксимации во втором приближении (часть 1)

| ТР | $M_p$ , кВт |                    | $P_{\text{макс}}$ , кВт |                    | $\sigma$ , кВт |                    |
|----|-------------|--------------------|-------------------------|--------------------|----------------|--------------------|
|    | исходный    | второе приближение | исходный                | второе приближение | исходный       | второе приближение |
| 1  | 466         | 466                | 770                     | 768                | 208            | 170                |
| 2  | 409         | 413                | 730                     | 750                | 231            | 219                |
| 3  | 458         | 457                | 810                     | 810                | 197            | 201                |
| 4  | 350         | 352                | 550                     | 548                | 138            | 116                |
| 5  | 329         | 326                | 530                     | 530                | 119            | 118                |

|      |       |       |     |     |     |     |
|------|-------|-------|-----|-----|-----|-----|
| 6    | 404   | 405   | 630 | 649 | 187 | 177 |
| 7    | 520   | 524   | 900 | 897 | 210 | 208 |
| 8    | 427   | 426   | 700 | 709 | 213 | 183 |
| 9    | 321   | 321   | 600 | 610 | 173 | 169 |
| 10   | 209   | 210   | 300 | 304 | 73  | 67  |
| 11   | 310   | 308   | 600 | 594 | 162 | 173 |
| 12   | 352   | 352   | 700 | 693 | 211 | 202 |
| 13   | 425   | 422   | 800 | 801 | 219 | 232 |
| 14   | 431   | 431   | 700 | 698 | 151 | 156 |
| 15   | 333   | 332   | 700 | 699 | 197 | 222 |
| 16   | 304   | 301   | 650 | 652 | 233 | 214 |
| 17   | 374   | 375   | 800 | 795 | 243 | 243 |
| 18   | 247   | 241   | 500 | 502 | 128 | 152 |
| 19   | 267   | 263   | 500 | 498 | 131 | 128 |
| 20   | 448   | 452   | 850 | 847 | 203 | 209 |
| 21   | 288   | 292   | 500 | 499 | 145 | 138 |
| 22   | 429   | 429   | 800 | 788 | 211 | 219 |
| 23   | 542   | 545   | 900 | 898 | 205 | 196 |
| 24   | 433   | 434   | 750 | 750 | 179 | 177 |
| 25   | 483   | 482   | 980 | 980 | 273 | 276 |
| 26   | 538   | 541   | 900 | 900 | 221 | 216 |
| 27   | 444   | 437   | 900 | 900 | 266 | 260 |
| 28   | 424   | 420   | 800 | 804 | 233 | 231 |
| 29   | 419   | 414   | 750 | 743 | 233 | 235 |
| 30   | 415   | 415   | 850 | 851 | 241 | 244 |
| 31   | 575   | 579   | 950 | 954 | 225 | 235 |
| 32   | 376   | 377   | 850 | 850 | 247 | 254 |
| 33   | 467   | 469   | 950 | 942 | 256 | 262 |
| 34   | 430   | 432   | 920 | 920 | 251 | 259 |
| 35   | 406   | 406   | 750 | 748 | 236 | 228 |
| 36   | 464   | 464   | 860 | 873 | 230 | 238 |
| Сред | 403   | 403   | 743 | 743 | 202 | 201 |
| Сумм | 14517 | 14513 |     |     |     |     |

Таблица 3.15 – Статистические параметры исходных графиков активной мощности нагрузки и функции аппроксимации во втором приближении (часть 2)

| ТР | $P_{мин}$ , кВт |                    | $\gamma$ |                    | $K_{макс}$ |                    |
|----|-----------------|--------------------|----------|--------------------|------------|--------------------|
|    | исходный        | второе приближение | исходный | второе приближение | исходный   | второе приближение |
| 1  | 174             | 169                | 0,44     | 0,36               | 1,65       | 1,65               |
| 2  | 140             | 175                | 0,56     | 0,53               | 1,78       | 1,86               |
| 3  | 150             | 131                | 0,43     | 0,44               | 1,77       | 1,77               |
| 4  | 120             | 140                | 0,39     | 0,33               | 1,57       | 1,55               |
| 5  | 200             | 123                | 0,36     | 0,36               | 1,61       | 1,62               |
| 6  | 150             | 15                 | 0,46     | 0,44               | 1,56       | 1,60               |
| 7  | 250             | 152                | 0,40     | 0,40               | 1,73       | 1,71               |
| 8  | 150             | 167                | 0,50     | 0,43               | 1,64       | 1,66               |
| 9  | 150             | 26                 | 0,53     | 0,53               | 1,87       | 1,90               |
| 10 | 100             | -31                | 0,35     | 0,32               | 1,44       | 1,45               |
| 11 | 100             | 6                  | 0,52     | 0,56               | 1,94       | 1,93               |
| 12 | 50              | 32                 | 0,60     | 0,57               | 1,99       | 1,97               |
| 13 | 200             | 0                  | 0,52     | 0,55               | 1,88       | 1,90               |
| 14 | 200             | 129                | 0,35     | 0,36               | 1,62       | 1,62               |
| 15 | 100             | -53                | 0,60     | 0,67               | 2,1        | 2,10               |
| 16 | 50              | -23                | 0,77     | 0,71               | 2,14       | 2,17               |
| 17 | 50              | -68                | 0,65     | 0,65               | 2,14       | 2,12               |
| 18 | 50              | -37                | 0,52     | 0,63               | 2,02       | 2,09               |
| 19 | 100             | 9                  | 0,49     | 0,49               | 1,87       | 1,89               |
| 20 | 100             | 86                 | 0,45     | 0,46               | 1,9        | 1,87               |
| 21 | 100             | 43                 | 0,50     | 0,47               | 1,74       | 1,71               |
| 22 | 200             | 79                 | 0,49     | 0,51               | 1,86       | 1,83               |
| 23 | 300             | 144                | 0,38     | 0,36               | 1,66       | 1,65               |

|      |      |      |       |       |       |       |
|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| 24   | 200  | 110  | 0,41  | 0,41  | 1,73  | 1,73  |
| 25   | 50   | 29   | 0,57  | 0,57  | 2,03  | 2,03  |
| 26   | 300  | 161  | 0,41  | 0,40  | 1,67  | 1,66  |
| 27   | 50   | -30  | 0,60  | 0,59  | 2,03  | 2,06  |
| 28   | 50   | -3   | 0,55  | 0,55  | 1,89  | 1,91  |
| 29   | 50   | 5    | 0,55  | 0,57  | 1,79  | 1,79  |
| 30   | 50   | 85   | 0,58  | 0,59  | 2,05  | 2,05  |
| 31   | 400  | 316  | 0,39  | 0,41  | 1,65  | 1,65  |
| 32   | 50   | 68   | 0,65  | 0,67  | 2,26  | 2,25  |
| 33   | 50   | -23  | 0,55  | 0,56  | 2,03  | 2,00  |
| 34   | 50   | -7   | 0,58  | 0,60  | 2,14  | 2,13  |
| 35   | 50   | 0    | 0,58  | 0,56  | 1,85  | 1,84  |
| 36   | 100  | 37   | 0,49  | 0,52  | 1,85  | 1,88  |
| Сред | 128  | 61   | 0,51  | 0,51  | 1,84  | 1,86  |
| Сумм | 4634 | 2162 | 18,17 | 18,13 | 66,45 | 66,60 |

Рассчитаем погрешности второй аппроксимации графиков активной мощности нагрузок Пряд-ткац. фабрики (для ТР25).

$$\begin{aligned}
 (\Phi^{[2]}(t))_{\text{ТР25}} &= 480 - 300 \cos(0,25t) - 235 \cos(t - 8); \\
 (M_R^{[2]})_{\text{ТР25}} &= (f_{\text{исх}}(t))_{\text{ТР25}} - (\Phi^{[2]}(t))_{\text{ТР25}} = \frac{16}{24} = 0,66; \\
 (M_R^{[2]\%})_{\text{ТР25}} &= \frac{0,66}{480} \times 100 = 0,14\%; \\
 (\delta_R^{[2]})_{\text{ТР25}} &= \sqrt{\frac{65599}{24}} = 52,28; \\
 (\delta_R^{[2]\%})_{\text{ТР25}} &= \frac{52,28}{480} \times 100 = 11\%.
 \end{aligned}
 \tag{3.33}$$

Результаты расчетов погрешностей для каждого трансформатора представлены в таблице 3.16.

Таблица 3.16 – Сравнение погрешностей аппроксимации в первом и втором приближении суточных графиков активной мощности нагрузок Прядильно-ткацкой фабрики

| ТР | Средняя разность  |                   |               |               | Среднеквадр. погрешность |                        |                    |                    |
|----|-------------------|-------------------|---------------|---------------|--------------------------|------------------------|--------------------|--------------------|
|    | $M_R^{[2]}$ , кВт | $M_R^{[1]}$ , кВт | $M_R^{[2]}$ % | $M_R^{[1]}$ % | $\delta_R^{[2]}$ , кВт   | $\delta_R^{[1]}$ , кВт | $\delta_R^{[2]}$ % | $\delta_R^{[1]}$ % |
| 1  | -0,30             | 4                 | -0,06         | 0,91          | 132,67                   | 104                    | 28                 | 22,41              |
| 2  | -3,90             | 5                 | -0,94         | 1,20          | 112,60                   | 85                     | 27                 | 20,50              |
| 3  | 1,20              | 3                 | 0,26          | 0,75          | 105,92                   | 89                     | 23                 | 19,37              |
| 4  | -2,73             | 7                 | -0,78         | 2,14          | 59,97                    | 54                     | 17                 | 15,48              |
| 5  | 3,23              | -3                | 0,99          | -0,76         | 54,26                    | 49                     | 17                 | 15,00              |
| 6  | -1,42             | 8                 | -0,35         | 2,10          | 30,89                    | 39                     | 8                  | 9,65               |
| 7  | -5,38             | -5                | -1,03         | -0,89         | 49,51                    | 76                     | 9                  | 14,72              |
| 8  | 1,04              | -3                | 0,24          | -0,69         | 68,16                    | 88                     | 16                 | 20,61              |
| 9  | 0,02              | -1                | 0,01          | -0,44         | 61,90                    | 83                     | 19                 | 25,85              |
| 10 | -1,22             | -4                | -0,58         | -1,93         | 32,97                    | 39                     | 16                 | 18,62              |
| 11 | 0,85              | 0                 | 0,28          | 0,09          | 50,06                    | 147                    | 16                 | 47,41              |
| 12 | 0,20              | 0                 | 0,06          | -0,08         | 36,18                    | 119                    | 10                 | 33,74              |
| 13 | 3,11              | -1                | 0,74          | -0,20         | 68,52                    | 123                    | 16                 | 29,04              |
| 14 | 0,20              | 1                 | 0,05          | 0,12          | 43,35                    | 77                     | 10                 | 17,76              |
| 15 | 1,13              | -2                | 0,34          | -0,46         | 127,41                   | 104                    | 38                 | 31,16              |
| 16 | 3,13              | 0                 | 1,04          | -0,01         | 78,41                    | 73                     | 26                 | 24,15              |
| 17 | -2,04             | 1                 | -0,55         | 0,33          | 63,83                    | 233                    | 17                 | 62,49              |
| 18 | 4,80              | 1                 | 1,99          | 0,50          | 69,56                    | 79                     | 29                 | 32,05              |
| 19 | 3,54              | 3                 | 1,34          | 1,04          | 56,15                    | 65                     | 21                 | 24,32              |
| 20 | -4,04             | 6                 | -0,89         | 1,39          | 71,91                    | 130                    | 16                 | 28,94              |
| 21 | -4,53             | 1                 | -1,55         | 0,51          | 35,11                    | 61                     | 12                 | 21,05              |
| 22 | 0,12              | 5                 | 0,03          | 1,16          | 75,28                    | 108                    | 18                 | 25,06              |
| 23 | -3,58             | 2                 | -0,66         | 0,46          | 110,52                   | 109                    | 20                 | 20,15              |
| 24 | -1,14             | -1                | -0,26         | -0,14         | 60,05                    | 117                    | 14                 | 27,06              |

|      |       |    |       |       |        |     |       |       |
|------|-------|----|-------|-------|--------|-----|-------|-------|
| 25   | 0,66  | -2 | 0,14  | -0,42 | 52,28  | 158 | 11    | 32,73 |
| 26   | -3,57 | 2  | -0,66 | 0,31  | 90,38  | 73  | 17    | 13,61 |
| 27   | 6,57  | 5  | 1,50  | 1,15  | 101,34 | 106 | 23    | 23,78 |
| 28   | 2,81  | 4  | 0,67  | 0,85  | 47,92  | 182 | 11    | 43,01 |
| 29   | 4,39  | 3  | 1,06  | 0,66  | 31,42  | 230 | 8     | 55,02 |
| 30   | -0,23 | 4  | -0,05 | 1,03  | 87,22  | 126 | 21    | 30,28 |
| 31   | -4,37 | -1 | -0,75 | -0,15 | 56,05  | 125 | 10    | 21,80 |
| 32   | 0,11  | 7  | 0,03  | 1,80  | 77,61  | 174 | 21    | 46,06 |
| 33   | -1,36 | 4  | -0,29 | 0,80  | 42,00  | 299 | 9     | 63,94 |
| 34   | -2,02 | 4  | -0,47 | 0,90  | 59,29  | 215 | 14    | 49,94 |
| 35   | 0,69  | 0  | 0,17  | 0,06  | 36,44  | 165 | 9     | 40,62 |
| 36   | -0,53 | 4  | -0,11 | 0,90  | 98,93  | 258 | 21    | 55,54 |
| Сред | -0,13 | 2  | -0,03 | 0,418 | 67,67  | 121 | 17,18 | 30    |

В таблице 3.16 представлено сравнение погрешностей аппроксимации в первом и втором приближении графиков активной мощности нагрузок Пряд-ткац. фабрики. В таблице 3.17 показаны результаты расчетов статистических параметров исходных и аппроксимированных в первом и втором приближении суточных графиков активной мощности нагрузок Пряд-ткац. фабрики.

Таблица 3.17 – Статистические параметры исходных и аппроксимированных графиков активной мощности нагрузок Прядельно-ткацкой фабрики в первом и втором приближении

| График          | $M_{P.сумм}$ , кВт | $P_{макс.сумм}$ ,кВт | $\tau$ , ч | $\sigma_{сумм}$ , кВт | $\gamma_{сред}$ | $K_{макс.сред}$ |
|-----------------|--------------------|----------------------|------------|-----------------------|-----------------|-----------------|
| Исходный        | 14517              | 23225                | 14:30 ч    | 7279                  | 0,51            | 1,85            |
| Аппроксимир [1] | 14579              | 24508                | 12:30 ч    | 7232                  | 0,49            | 1,67            |
| Аппроксимир [2] | 14513              | 22778                | 14:30 ч    | 7227                  | 0,51            | 1,86            |

На рисунке 3.13 показаны суммарный исходный график активной мощности нагрузок Пряд-ткац. фабрики и аппроксимированный во втором приближении.



Рисунок 3.13. Исходный график активной нагрузки и его вторая приближённая аппроксимация

Для второго приближения выявлена достаточно точная степень совпадения графиков – в соответствии со статистическими данными таблиц 3.14 и 3.15; оценка погрешностей – в таблице 3.16; время и значение максимума – рисунок 3.13 (14:30 ч; 22778 кВт).

Разницы функций аппроксимации в первом и втором приближении активной мощности представлены в таблице 3.18

Таблица 3.18 – Сравнение функций аппроксимации в первом и втором приближении активной мощности нагрузок трансформаторов Прядильно-ткацкой фабрики

| ТР | функции аппроксимации в первом приближении | функции аппроксимации во втором приближении |
|----|--|---|
| 1  | $460-300 \cos(0,25t)$                      | $460-200 \cos(0,25t) -120 \cos(t-4)$        |
| 2  | $400-300 \cos(0,25t)$                      | $400-300 \cos(0,25t) -70 \cos(5t/6-4)$      |
| 3  | $450-300 \cos(0,25t)$                      | $480-250 \cos(0,25t) -110 \cos(5t/6+5)$     |
| 4  | $350-200 \cos(0,25t)$                      | $345-150 \cos(0,25t) +65 \cos(t+8)$         |
| 5  | $320-150 \cos(0,25t)$                      | $320-150 \cos(0,25t) +70 \cos(t+5)$         |

|      |                           |  |
|------|---------------------------|--|
| 6    | $400-250 \cos(0,25t)$     | $300-250 \cos(0,25t) + 65 \cos(t+3)$       |
| 7    | $500-300 \cos(0,25t)$     | $500-300 \cos(0,25t) + 110 \cos(4t/6+5)$   |
| 8    | $410-300 \cos(0,25t)$     | $410-250 \cos(0,25t) + 100 \cos(5t/6+6)$   |
| 9    | $310-200 \cos(0,25t)$     | $310-250 \cos(0,25t) + 150 \cos(5t/6+6)$   |
| 10   | $200-100 \cos(0,25t)$     | $205-95 \cos(0,25t) + 15 \cos(t+4)$        |
| 11   | $300-200 \cos(0,25t)$     | $330-200 \cos(0,25t-1) - 130 \cos(t-5)$    |
| 12   | $340-250 \cos(0,25t)$     | $345-250 \cos(0,25t-0,5) - 130 \cos(t-5)$  |
| 13   | $410-300 \cos(0,25t)$     | $400-300 \cos(0,25t) - 170 \cos(t-6)$      |
| 14   | $420-250 \cos(0,25t)$     | $420-200 \cos(0,25t) - 100 \cos(t-5)$      |
| 15   | $320-250 \cos(0,25t)$     | $320-300 \cos(0,25t-1) - 110 \cos(t-6)$    |
| 16   | $290-300 \cos(0,25t)$     | $285-300 \cos(0,25t) + 70 \cos(5t/3-3)$    |
| 17   | $360-300 \cos(0,25t)$     | $360-300 \cos(0,25t+0,5) - 165 \cos(t-6)$  |
| 18   | $240-150 \cos(0,25t)$     | $240-150 \cos(0,25t+0,5) - 140 \cos(t-10)$ |
| 19   | $260-200 \cos(0,25t)$     | $240-150 \cos(0,25t+0,5) + 90 \cos(t+6)$   |
| 20   | $440-300 \cos(0,25t)$     | $240-150 \cos(0,25t+0,5) - 200 \cos(t-10)$ |
| 21   | $280-190 \cos(0,25t)$     | $280-190 \cos(0,25t) - 70 \cos(t+6)$       |
| 22   | $420-300 \cos(0,25t)$     | $410-300 \cos(0,25t) - 115 \cos(3t/2+6)$   |
| 23   | $530-300 \cos(0,25t)$     | $530-200 \cos(0,25t) + 200 \cos(6t/5+6)$   |
| 24   | $420-270 \cos(0,25t)$     | $420-230 \cos(0,25t-0,5) - 115 \cos(t+6)$  |
| 25   | $480-440 \cos(0,25t)$     | $480-300 \cos(0,25t) - 235 \cos(t-8)$      |
| 26   | $525-300 \cos(0,25t)$     | $525-300 \cos(0,25t+0,5) - 80 \cos(2t-6)$  |
| 27   | $430-400 \cos(0,25t)$     | $425-300 \cos(0,25t) - 200 \cos(t-8)$      |
| 28   | $410-350 \cos(0,25t)$     | $415-270 \cos(0,25t-0,7) - 160 \cos(t-4)$  |
| 29   | $405-350 \cos(0,25t)$     | $415-300 \cos(0,25t-1) - 110 \cos(t-4)$    |
| 30   | $400-400 \cos(0,25t)$     | $470-320 \cos(0,25t-0,8) - 70 \cos(t-4,5)$ |
| 31   | $560-300 \cos(0,25t)$     | $630-300 \cos(0,25t-1) - 140 \cos(t-6)$    |
| 32   | $365-400 \cos(0,25t)$     | $390-300 \cos(0,25t) - 210 \cos(t-6)$      |
| 33   | $450-450 \cos(0,25t)$     | $450-300 \cos(0,25t-0,9) - 225 \cos(t-6)$  |
| 34   | $415-400 \cos(0,25t)$     | $410-300 \cos(0,25t-0,6) - 230 \cos(t-6)$  |
| 35   | $390-350 \cos(0,25t)$     | $395-300 \cos(0,25t-0,6) - 100 \cos(t-8)$  |
| 36   | $450-380 \cos(0,25t)$     | $450-300 \cos(0,25t-1) - 150 \cos(t-6)$    |
| Сумм | $14090+10480 \cos(0,25t)$ | Суммарный в приложении А                   |

### 3.6. Применение методики выбора функций аппроксимации графиков активных нагрузок производств Прядельно-ткацкой фабрики

С учётом технологических циклов производства продукции (приложение Б), фабрику можно разделить на три относительно автономные технологические части: ткацкое производство, прядельное производство и прочие потребители.

1. К ткацкому производству относятся 15 трансформаторов (ТР1→ТР15) напряжением 11/0,4 кВ. На рисунке 3.14а представлены графики электропотребителей ткацкого производства (при установке батарей конденсаторов) для ТР7 и ТР13.

2. К прядельному производству относятся 16 трансформаторов (ТР16→ТР31) напряжением 11/0,4 кВ. На рисунке 3.14б представлены графики электропотребителей прядельного производства при установке батарей конденсаторов для ТР22; ТР23; ТР25 ТР26; ТР27; ТР30; ТР31.

3. К другим потребителям относятся 5 трансформаторов (ТР32→ТР36) напряжением 11/0,4 кВ. На рисунке 3.14в представлены графики прочих электропотребителей при установке батарей конденсаторов для ТР32; ТР33; ТР34.

В таблицах 3.19 и 3.20 приведены расчетные параметры исходных (Исх.) и аппроксимированных (Апп.) графиков полной мощности нагрузок для основных производств Пряд-ткац. фабрики.

Аппроксимированные функции для графиков нагрузок ткацкого, прядельного производств, прочих потребителей и суммарного:

$$\begin{aligned}
 \Phi(t)_{\text{ткац}} &= 5,7 - 3,5 \cos(0,25t); \\
 \Phi(t)_{\text{пряд}} &= 6,6 - 3,8 \cos(0,25t); \\
 \Phi(t)_{\text{проч}} &= 2,1 - 1,9 \cos(0,25t); \\
 \Phi(t)_{\text{сумм.апп.фаб.комп}} &= \Phi(t)_{\text{ткац}} + \Phi(t)_{\text{пряд}} + \Phi(t)_{\text{проч}}; \\
 \Phi(t)_{\text{сумм.апп.фаб.комп}} &= 14,4 - 9,2 \cos(0,25t).
 \end{aligned}
 \tag{3.34}$$

Таблица 3.19 – Расчетные параметры суточных исходных и аппроксимированных графиков полной мощности нагрузок для основных производств Прядильно-ткацкой фабрики

| Время, ч | Ткацкое производство |                | Прядильное производство |                | Прочих        |                |
|----------|----------------------|----------------|-------------------------|----------------|---------------|----------------|
|          | исходный, МВА        | аппроксим, МВА | исходный, МВА           | аппроксим, МВА | исходный, МВА | аппроксим, МВА |
| 1        | 2,65                 | 2,31           | 3                       | 2,92           | 0,95          | 0,26           |
| 2        | 2,65                 | 2,63           | 2,8                     | 3,27           | 1,05          | 0,43           |
| 3        | 2,75                 | 3,14           | 2,9                     | 3,82           | 1,02          | 0,71           |
| 4        | 2,9                  | 3,81           | 3                       | 4,55           | 1             | 1,07           |
| 5        | 2,98                 | 4,6            | 3,5                     | 5,4            | 0,8           | 1,5            |
| 6        | 3,45                 | 5,45           | 4,85                    | 6,33           | 0,7           | 1,97           |
| 7        | 5,35                 | 6,32           | 6,25                    | 7,28           | 1,2           | 2,44           |
| 8        | 7                    | 7,16           | 7,35                    | 8,18           | 2,25          | 2,89           |
| 9        | 7,9                  | 7,9            | 8,2                     | 8,99           | 3             | 3,29           |
| 10       | 8,45                 | 8,5            | 9,2                     | 9,64           | 3,05          | 3,62           |
| 11       | 8                    | 8,94           | 10,15                   | 10,11          | 2,65          | 3,86           |
| 12       | 8,1                  | 9,16           | 10,25                   | 10,36          | 2,45          | 3,98           |
| 13       | 8,9                  | 9,18           | 10,2                    | 10,38          | 2,75          | 3,99           |
| 14       | 9,5                  | 8,98           | 10,1                    | 10,16          | 3,5           | 3,88           |
| 15       | 9,3                  | 8,57           | 10                      | 9,72           | 4             | 3,66           |
| 16       | 8,65                 | 7,99           | 9,5                     | 9,08           | 3,9           | 3,34           |
| 17       | 7,25                 | 7,26           | 8,8                     | 8,3            | 3,25          | 2,95           |
| 18       | 6,45                 | 6,44           | 7,9                     | 7,4            | 2,5           | 2,5            |
| 19       | 5,15                 | 5,57           | 6,9                     | 6,46           | 2,2           | 2,03           |
| 20       | 5,1                  | 4,71           | 6,15                    | 5,52           | 2,3           | 1,56           |
| 21       | 4,75                 | 3,91           | 5                       | 4,65           | 2,4           | 1,13           |
| 22       | 4,15                 | 3,22           | 4,2                     | 3,91           | 2,15          | 0,75           |
| 23       | 3,5                  | 2,69           | 4                       | 3,33           | 1,7           | 0,46           |
| 24       | 2,85                 | 2,34           | 3,5                     | 2,95           | 0,9           | 0,28           |

Продолжение таблицы 3.19

|                          |                                 |      |                                 |       |                                 |      |
|--------------------------|---------------------------------|------|---------------------------------|-------|---------------------------------|------|
| $S_{\max}$               | 9,5                             | 9,18 | 10,25                           | 10,38 | 4                               | 3,99 |
| $S_{\min}$               | 2,65                            | 2,31 | 2,8                             | 2,92  | 0,7                             | 0,26 |
| $0,5(S_{\max}-S_{\min})$ | 3,42                            | 3,43 | 3,72                            | 3,73  | 1,65                            | 1,86 |
| $S_{\text{сред}}$        | 5,78                            | 5,71 | 6,57                            | 6,61  | 2,15                            | 2,12 |
| $\Phi(t)$                | $\Phi_1(t)=5,7-3,5 \cos(0,25t)$ |      | $\Phi_2(t)=6,6-3,8 \cos(0,25t)$ |       | $\Phi_3(t)=2,1-1,9 \cos(0,25t)$ |      |

Таблица 3.20 – Расчетные параметры исходных и аппроксимированных графиков полной мощности нагрузок производств Прядильно-ткацкой фабрики с учетом КУ

| Показатель              | 1. Ткацкое |         | 2. Прядильное |         | 3. Прочие |         | Сумм  |       |
|-------------------------|------------|---------|---------------|---------|-----------|---------|-------|-------|
|                         | Исх.       | Апп.    | Исх.          | Апп.    | Исх.      | Апп.    | Исх.  | Апп.  |
| $S_{\text{сред}}$ , МВА | 5,78       | 5,71    | 6,57          | 6,61    | 2,15      | 2,12    | 14,46 | 14,83 |
| $S_{\max}$ , МВА        | 9,50       | 9,18    | 10,25         | 10,38   | 4         | 3,99    | 23,3  | 23,54 |
| $K_{\text{эп}}$         | 0,61       | 0,62    | 0,64          | 0,63    | 0,53      | 0,53    | 0,62  | 0,63  |
| $S_{\text{эфф}}$ , МВА  | 6,22       | 6,34    | 7,11          | 7,27    | 2,37      | 2,55    | 15,66 | 16,13 |
| $\sigma_S$ , МВА        | 2,41       | 2,42    | 2,73          | 2,62    | 0,99      | 1,31    | 6,02  | 6,34  |
| $\gamma$                | 0,42       | 0,42    | 0,42          | 0,40    | 0,46      | 0,62    | 0,42  | 0,43  |
| $\tau$ , ч              | 14:30 ч    | 12:30 ч | 12:30 ч       | 12:30 ч | 15:30 ч   | 12:30 ч |       |       |

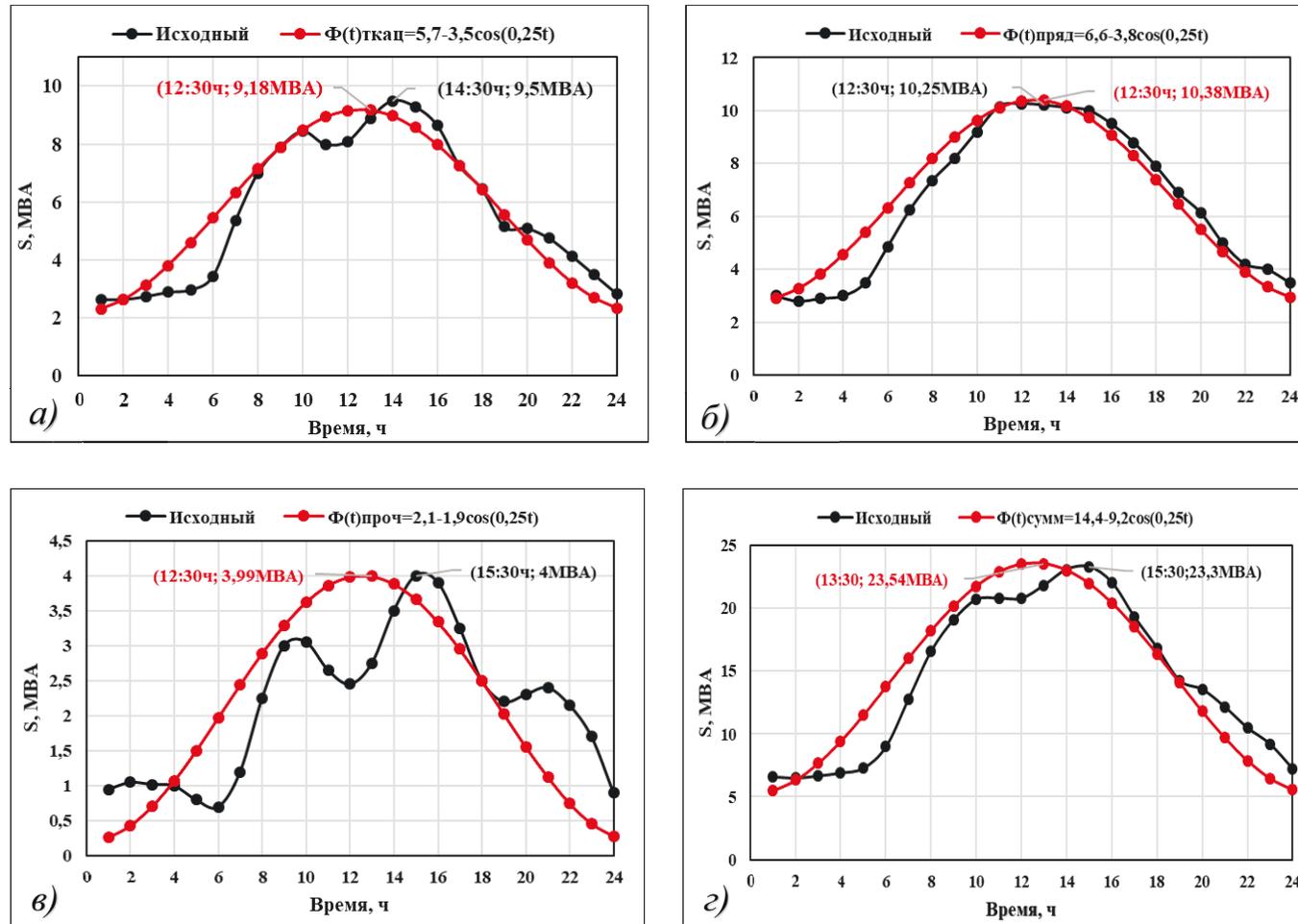


Рисунок 3.14 – Исходный и аппроксимированный графики полной мощности нагрузок:

а) ткацкого производства; б) прядильного производства; в) прочих потребителей; г) Суммарный

На рисунке 3.14 показано, что

1. для прядильного производства аппроксимированные графики нагрузок – достаточно достоверные;
2. для ткацкого производства, а также прочих потребителей аппроксимация недостаточно точная – особенно в несовпадении максимумов нагрузок;
3. суммарный аппроксимированный график нагрузки Прядильно-ткацкой фабрики сдвинут назад на 2 часа с (15:30 ч) до (13:30 ч).

В таблице 3.21 показаны функции приближённых аппроксимаций графиков исходных нагрузок производств и численные параметры суммы аппроксимированных графиков и исходного графика Пряд-ткац. фабрики.

Таблица 3.21 – Параметры характеристик графиков производств и суммарного графика Прядильно-ткацкой фабрики

| Время, ч | Ткацкое,<br>МВА           | Прядильное,<br>МВА        | Прочие,<br>МВА            | Сумм,<br>МВА |                             |
|----------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------|-----------------------------|
|          | 5,7<br>$-3,5 \cos(0,25t)$ | 6,6<br>$-3,8 \cos(0,25t)$ | 2,1<br>$-1,9 \cos(0,25t)$ | Исходный     | 14,4<br>$-9,2 \cos(0,5t+5)$ |
| 1        | 2,65                      | 3                         | 0,95                      | 6,6          | 5,48                        |
| 2        | 2,65                      | 2,8                       | 1,05                      | 6,5          | 6,32                        |
| 3        | 2,75                      | 2,9                       | 1,02                      | 6,67         | 7,66                        |
| 4        | 2,9                       | 3                         | 1                         | 6,9          | 9,42                        |
| 5        | 2,98                      | 3,5                       | 0,8                       | 7,28         | 11,49                       |
| 6        | 3,45                      | 4,85                      | 0,7                       | 9            | 13,74                       |
| 7        | 5,35                      | 6,25                      | 1,2                       | 12,8         | 16,03                       |
| 8        | 7                         | 7,35                      | 2,25                      | 16,6         | 18,22                       |
| 9        | 7,9                       | 8,2                       | 3                         | 19,1         | 20,17                       |
| 10       | 8,45                      | 9,2                       | 3,05                      | 20,7         | 21,77                       |
| 11       | 8                         | 10,15                     | 2,65                      | 20,8         | 22,90                       |
| 12       | 8,1                       | 10,25                     | 2,45                      | 20,8         | 23,50                       |
| 13       | 8,9                       | 10,2                      | 2,75                      | 21,85        | 23,54                       |

Продолжение таблицы 3.21

|                               |        |        |        |       |       |
|-------------------------------|--------|--------|--------|-------|-------|
| 14                            | 9,5    | 10,1   | 3,5    | 23,1  | 23,01 |
| 15                            | 9,3    | 10     | 4      | 23,3  | 21,94 |
| 16                            | 8,65   | 9,5    | 3,9    | 22,05 | 20,41 |
| 17                            | 7,25   | 8,8    | 3,25   | 19,3  | 18,50 |
| 18                            | 6,45   | 7,9    | 2,5    | 16,85 | 16,33 |
| 19                            | 5,15   | 6,9    | 2,2    | 14,25 | 14,05 |
| 20                            | 5,1    | 6,15   | 2,3    | 13,55 | 11,79 |
| 21                            | 4,75   | 5      | 2,4    | 12,15 | 9,68  |
| 22                            | 4,15   | 4,2    | 2,15   | 10,5  | 7,88  |
| 23                            | 3,5    | 4      | 1,7    | 9,2   | 6,47  |
| 24                            | 2,85   | 3,5    | 0,9    | 7,25  | 5,56  |
| $S_{\text{сред}}, \text{МВА}$ | 5,71   | 6,61   | 2,12   | 14,46 | 14,83 |
| $S_{\text{макс}}, \text{МВА}$ | 9,18   | 10,38  | 3,99   | 23,3  | 23,54 |
| $K_{\text{зн}}$               | 0,62   | 0,63   | 0,53   | 0,62  | 0,63  |
| $S_{\text{эфф}}, \text{МВА}$  | 6,34   | 7,27   | 2,55   | 15,66 | 16,13 |
| $\sigma_s, \text{МВА}$        | 2,42   | 2,62   | 1,31   | 6,02  | 6,34  |
| $\gamma_s$                    | 0,42   | 0,40   | 0,62   | 0,42  | 0,43  |
| Начало<br>работы, ч           | 5:30 ч | 5:30 ч | 8:30 ч |       |       |

Данные таблицы 3.21 показывают, что численные параметры суммы аппроксимированных графиков и исходного графика Прядильно-ткацкой фабрики, в основном, примерно совпадают. Поэтому для выравнивания графиков нагрузок фабрики используем полученные функции аппроксимации, а затем сравним результат с фактическими графиками нагрузок.

### 3.7. Применение методики выбора функций аппроксимации графиков активных нагрузок коммунально-бытового сектора, получающего питание от трансформаторов подстанции «Кабун-1»

В таблице 3.22 даны численные параметры исходного и аппроксимированного графиков Ком-быт. потребителей ПС «Кабун-1», которые показывают достаточную сходимость.

Таблица 3.22 – Параметры исходного и аппроксимированного графиков полной  
мощности нагрузки коммунально-бытовых потребителей трансформаторов 33/11  
кВ

| Время, ч | Исходный, МВА | Аппроксимированный<br>$S_{\text{апп}}=15-7 \cos(0,5t+5)$ , МВА |
|----------|---------------|--|
| 1        | 7,4           | 10,04  |
| 2        | 7,4           | 8,28   |
| 3        | 7,4           | 8,16   |
| 4        | 7,5           | 9,72   |
| 5        | 10            | 12,57  |
| 6        | 18            | 16,02  |
| 7        | 20            | 19,21  |
| 8        | 20            | 21,38  |
| 9        | 22            | 21,98  |
| 10       | 20            | 20,87  |
| 11       | 15            | 18,33  |
| 12       | 13            | 14,97  |
| 13       | 12            | 11,62  |
| 14       | 12            | 9,09   |
| 15       | 11            | 8,02   |
| 16       | 10            | 8,65   |
| 17       | 12,5          | 10,84  |

|                               |       |       |
|-------------------------------|-------|-------|
| 18                            | 17    | 14,04 |
| 19                            | 21    | 17,48 |
| 20                            | 23    | 20,32 |
| 21                            | 22    | 21,85 |
| 22                            | 21,9  | 21,7  |
| 23                            | 10    | 19,92 |
| 24                            | 7     | 16,93 |
| $S_{\text{сред}}, \text{МВА}$ | 14,46 | 15,08 |
| $S_{\text{макс}}, \text{МВА}$ | 23    | 21,98 |
| $S_{\text{мин}}, \text{МВА}$  | 7     | 8,02  |
| $K_{\text{эп}}$               | 0,63  | 0,69  |
| $S_{\text{эфф}}, \text{МВА}$  | 15,49 | 15,91 |
| $\sigma_S, \text{МВА}$        | 5,55  | 5,05  |
| $\gamma$                      | 0,38  | 0,33  |

По таблице 3.22

$$\begin{aligned}
 B^{[1]} &= S_{\text{сред}} = 15 \text{ МВА}; \\
 A^{[1]} &= \frac{S_{\text{макс}} - S_{\text{мин}}}{2} = \frac{21,98 - 8,02}{2} = 7 \text{ МВА}; \\
 \omega^{[1]} &= \frac{2\pi}{T^{[1]}} = \frac{6}{12} = 0,5 \text{ ч}^{-1}; \\
 j_0^{[1]} &= 2\pi \cdot \omega^{[1]} t_0 = 6 \times 0,5 \times 1,5 = 5 \text{ ч}.
 \end{aligned}
 \tag{3.35}$$

Аппроксимирующая функция

$$\begin{aligned}
 \Phi^{[1]}(t) &= B^{[1]} - A^{[1]} \cos(\omega^{[1]} t + j_0^{[1]}); \\
 \Phi^{[1]}(t) &= 15 - 7 \cos(0,5t + 5).
 \end{aligned}
 \tag{3.36}$$

На рисунке 3.15 показаны графики полной мощности (исходный и аппроксимированный) нагрузок коммунально-бытовых потребителей трансформаторов 33/11 кВ.

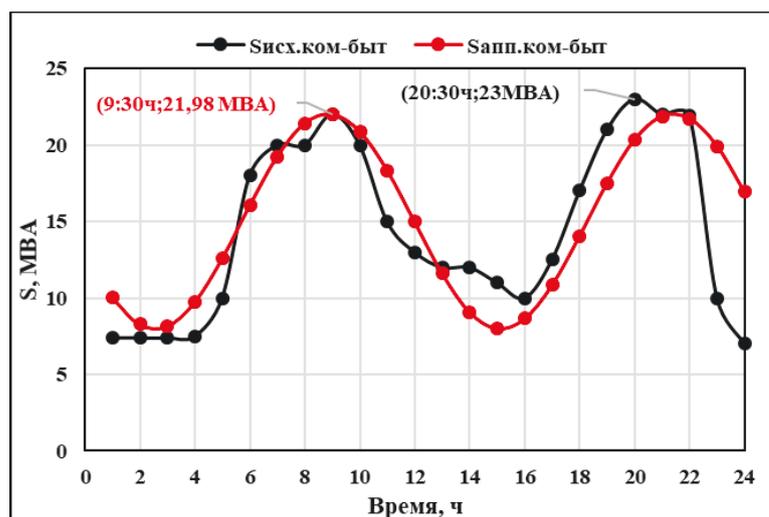


Рисунок 3.15 – Графики полной мощности нагрузок коммунально-бытовых потребителей трансформаторов 33/11 кВ – исходный и аппроксимированный  $15-7 \cos(0,5t+5)$

Рисунок 3.15 и данные таблицы 3.22 показывают, что за сутки наблюдаются два максимума:

1. утренний с 08:30 ч до 10:30 ч около 21,98 МВА;
2. вечерний с 20:30 ч до 22:30 ч около 21,85 МВА;
3. снижение нагрузки до 8,02 МВА наблюдается с 12:30 ч до 17:30 ч.

### 3.8. Выводы по главе

1. Проведены экспериментальные измерения в течение шести суток и по результатам статистической обработки данных представлена совокупность исходных суточных значений (с часовым интервалом) графиков активной, реактивной и полной нагрузки 36 трансформаторов СЭС Прядыльно-ткацкой фабрики.

2. Установлено, что значения коэффициентов загрузки трансформаторов напряжением 11/0,4 кВ по полной мощности в максимальном режиме равны (0,37 – 1,22) (таблица 3.5). То есть, имеется систематическая перегрузка для ряда трансформаторов в режиме максимальных нагрузок, что происходит из-за значительных реактивных нагрузок данных трансформаторов. Для устранения

систематических перегрузок рекомендуется установка устройств компенсации реактивной мощности на стороне 0,4 кВ трансформаторов.

3. Проведён анализ корреляционных связей между графиками активной мощности нагрузок трансформаторов и графиком суммарной активной мощности нагрузок Прядильно-ткацкой фабрики, в результате чего установлено, что коэффициенты корреляции в периоды максимальной нагрузки равны, примерно, 1, а в периоды минимальной нагрузки находятся в интервале от 0,08 до 0,60 (таблица 3.7).

4. Установлено, что при регулировании потребления ЭЭ, исходные суточные графики мощности нагрузок трансформаторов Прядильно-ткацкой фабрики в первом приближении достоверно аппроксимируются функцией косинуса с периодом  $T^{[1]} = 24$  ч, но для совпадения минимального и максимального значения мощности во втором приближении, целесообразно использовать сумму двух гармонических функций косинуса с периодом  $T_1^{[2]} = 24$  ч, и  $T_2^{[2]} \approx 6$  ч.

5. Установлено, что график мощности нагрузок коммунально-бытовых потребителей с двумя максимальными значениями мощности (утром и вечером) с достаточной степенью достоверности аппроксимируется функцией косинуса с периодом 12 ч и начальной фазой – 5 ч (рисунок 3.15). Поэтому для выравнивания графиков нагрузок фабрики используем полученные функции аппроксимации, а затем проведем сравнение результатов с реальными графиками нагрузок.

#### 4. ВЫБОР И АНАЛИЗ СПОСОБОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ

##### 4.1. Анализ и исследование способов выравнивания графиков нагрузки электропотребителей, получающих питание от трансформаторов подстанции «Кабун-1» – вариант 1, вариант 2

Из возможных способов выравнивания графиков нагрузок [92-97] выбраны следующие:

1. Первый вариант (вар. 1): сдвиг времени начала работы ткацкого производства с 5:30 ч на 12:30 ч, остальные производства работают в исходных режимах.

2. Вторым вариантом (вар. 2): сдвиг времени начала работы ткацкого производства с 5:30 ч на 12:30 ч и прядильного производства с 5:30 ч на 22:30 ч, остальные потребители работают в исходных режимах.

В таблице 4.1 представлены исходный, вар. 1 и вар. 2 первой смены производств (прочие; ткацкое; прядильное), а также времена максимальной и минимальной нагрузки.

Таблица 4.1 – Рассматриваемые варианты времен начала первой смены основных производств потребителей Прядильно-ткацкой фабрики и времен максимума и минимума мощности нагрузки

| Производство         | Прочие             | Ткацкое            |                    |                    | Прядильное         |                    |                    |
|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|                      |                    | Исходный           | Вар.1              | Вар.2              | Исходный           | Вар.1              | Вар.2              |
| Сдвиг по времени     | Исходный           | Исходный           | Вар.1              | Вар.2              | Исходный           | Вар.1              | Вар.2              |
| Начало 1-ой смены, ч | 8:30 ч             | 5:30 ч             | 12:30 ч            | 12:30 ч            | 5:30 ч             | 5:30 ч             | 22:30 ч            |
| Время Максимума, ч   | 14:30 ч<br>16:30 ч | 14:30 ч<br>15:30 ч | 21:30 ч<br>22:30 ч | 21:30 ч<br>22:30 ч | 11:30 ч<br>15:30 ч | 11:30 ч<br>15:30 ч | 4:30 ч<br>8:30 ч   |
| Время Минимума, ч    | 23:30 ч<br>6:30 ч  | 23:30 ч<br>4:30 ч  | 8:30 ч<br>11:30 ч  | 8:30 ч<br>11:30 ч  | 0:00 ч<br>3:00 ч   | 0:00 ч<br>3:00 ч   | 18:30 ч<br>21:30 ч |

#### 4.2. Параметры графиков нагрузок трансформаторов 33/11 кВ подстанции «Кабун-1» – вариант 1, вариант 2

Согласно данным главы 3 (рисунок 3.14) получены аппроксимирующие функции полной мощности для производств Фабрики (ткацкого; прядильного; прочих) с учетом КУ.

Суммарная полная мощность нагрузок Пряд-ткац. с учетом (КУ; вар. 1; вар. 2) вычисляется по выражению:

$$\begin{aligned} S_{\text{сумм.апп.фаб.комп}} &= S_{\text{ткац}} + S_{\text{пряд}} + S_{\text{проч}} = 14,4 - 9,2 \cos(0,25t); \\ S_{\text{сумм.апп.фаб.вар.1}} &= S_{\text{ткац}(j_0=-8)} + S_{\text{пряд}} + S_{\text{проч}}; \\ S_{\text{сумм.апп.фаб.вар.2}} &= S_{\text{ткац}(j_0=-8)} + S_{\text{пряд}(j_0=+2)} + S_{\text{проч}}. \end{aligned} \quad (4.1)$$

где  $S_{\text{ткац}}$  – полная мощность нагрузок ткацкого производства;  $S_{\text{пряд}}$  – полная мощность нагрузок прядильного производства;  $S_{\text{проч}}$  – полная мощность нагрузок прочих потребителей.

Результаты расчетов представлены в таблицах 4.2, 4.3, 4.4

Таблица 4.2 – Параметры графиков производств Прядильно-ткацкой фабрики – вариант 1, вариант 2

| Время, ч | Ткацкое                 | Прядильное            | Прочие                | $S_{\text{сумм.апп.фаб.вар.1}}$ ,<br>МВА |
|----------|-------------------------|-----------------------|-----------------------|--|
|          | $5,7-3,5 \cos(0,25t-8)$ | $6,6-3,8 \cos(0,25t)$ | $2,1-1,9 \cos(0,25t)$ |  |
| 1        | 5,34                    | 2,92                  | 0,26                  | 8,52                                     |
| 2        | 4,49                    | 3,27                  | 0,43                  | 8,19                                     |
| 3        | 3,71                    | 3,82                  | 0,71                  | 8,24                                     |
| 4        | 3,06                    | 4,55                  | 1,07                  | 8,68                                     |
| 5        | 2,57                    | 5,4                   | 1,5                   | 9,47                                     |
| 6        | 2,28                    | 6,33                  | 1,97                  | 10,58                                    |
| 7        | 2,2                     | 7,28                  | 2,44                  | 11,92                                    |
| 8        | 2,34                    | 8,18                  | 2,89                  | 13,41                                    |

|    |      |       |      |       |
|----|------|-------|------|-------|
| 9  | 2,69 | 8,99  | 3,29 | 14,97 |
| 10 | 3,22 | 9,64  | 3,62 | 16,48 |
| 11 | 3,91 | 10,11 | 3,86 | 17,88 |
| 12 | 4,71 | 10,36 | 3,98 | 19,05 |
| 13 | 5,57 | 10,38 | 3,99 | 19,94 |
| 14 | 6,44 | 10,16 | 3,88 | 20,48 |
| 15 | 7,26 | 9,72  | 3,66 | 20,64 |
| 16 | 7,99 | 9,08  | 3,34 | 20,41 |
| 17 | 8,57 | 8,3   | 2,95 | 19,82 |
| 18 | 8,98 | 7,4   | 2,5  | 18,88 |
| 19 | 9,18 | 6,46  | 2,03 | 17,67 |
| 20 | 9,16 | 5,52  | 1,56 | 16,24 |
| 21 | 8,94 | 4,65  | 1,13 | 14,72 |
| 22 | 8,5  | 3,91  | 0,75 | 13,16 |
| 23 | 7,9  | 3,33  | 0,46 | 11,69 |
| 24 | 7,16 | 2,95  | 0,28 | 10,39 |

Таблица 4.3 – Параметры графиков производств Прядельно-ткацкой фабрики – вариант 2

| Время, ч | Ткацкое                 | Прядельное              | Прочие                | $S_{\text{сумм. апп. фаб. вар. 2, МВА}}$ |
|----------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--|
|          | $5,7-3,5 \cos(0,25t-8)$ | $6,6-3,8 \cos(0,25t+2)$ | $2,1-1,9 \cos(0,25t)$ |  |
| 1        | 5,34                    | 8,99                    | 0,26                  | 14,59                                    |
| 2        | 4,49                    | 9,64                    | 0,43                  | 14,56                                    |
| 3        | 3,71                    | 10,11                   | 0,71                  | 14,53                                    |
| 4        | 3,06                    | 10,36                   | 1,07                  | 14,49                                    |
| 5        | 2,57                    | 10,38                   | 1,5                   | 14,46                                    |
| 6        | 2,28                    | 10,16                   | 1,97                  | 14,41                                    |
| 7        | 2,2                     | 9,72                    | 2,44                  | 14,36                                    |

|    |      |      |      |       |
|----|------|------|------|-------|
| 8  | 2,34 | 9,08 | 2,89 | 14,31 |
| 9  | 2,69 | 8,3  | 3,29 | 14,28 |
| 10 | 3,22 | 7,4  | 3,62 | 14,24 |
| 11 | 3,91 | 6,46 | 3,86 | 14,22 |
| 12 | 4,71 | 5,52 | 3,98 | 14,21 |
| 13 | 5,57 | 4,65 | 3,99 | 14,21 |
| 14 | 6,44 | 3,91 | 3,88 | 14,23 |
| 15 | 7,26 | 3,33 | 3,66 | 14,25 |
| 16 | 7,99 | 2,95 | 3,34 | 14,28 |
| 17 | 8,57 | 2,8  | 2,95 | 14,32 |
| 18 | 8,98 | 2,89 | 2,5  | 14,37 |
| 19 | 9,18 | 3,21 | 2,03 | 14,42 |
| 20 | 9,16 | 3,74 | 1,56 | 14,47 |
| 21 | 8,94 | 4,44 | 1,13 | 14,5  |
| 22 | 8,5  | 5,28 | 0,75 | 14,54 |
| 23 | 7,9  | 6,21 | 0,46 | 14,57 |
| 24 | 7,16 | 7,15 | 0,28 | 14,58 |

Таблица 4.4 – Суммарные параметры аппроксимированных графиков Пряжильно-ткацкой фабрики – исходного, вариант 1 и вариант 2

| Показатель              | $S_{\text{сумм.фаб.вар.1}}$ , МВА | $S_{\text{сумм.фаб.вар.2}}$ , МВА | $S_{\text{исх.фаб}}$ , МВА |
|-------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|
| $S_{\text{сред}}$ , МВА | 14,61                             | 14,39                             | 14,46                      |
| $S_{\text{макс}}$ , МВА | 20,64                             | 14,59                             | 23,3                       |
| $K_{3n}$                | 0,71                              | 0,99                              | 0,62                       |
| $S_{\text{эфф}}$ , МВА  | 15,27                             | 14,39                             | 15,66                      |
| $\sigma_S$ , МВА        | 4,52                              | 0,13                              | 6,02                       |
| $\gamma_S$              | 0,31                              | 0,01                              | 0,42                       |

Данные таблицы 4.4 показывают, что: при вар. 2 – наиболее эффективном – максимальное значение нагрузки снижается на 8,71 МВА - с 23,3 МВА до 14,59 МВА (по отношению к исходному), а средние значения мощности нагрузки примерно равны; вариация нагрузки снижается с 0,42 до 0,01, то есть график нагрузки в вар. 2 – практически постоянный. На рисунке 4.1 и 4.2 представлены графики нагрузок рассматриваемых производств и суммарный график Пряд-ткац. фабрики для двух вариантов сдвига времени начала работы.

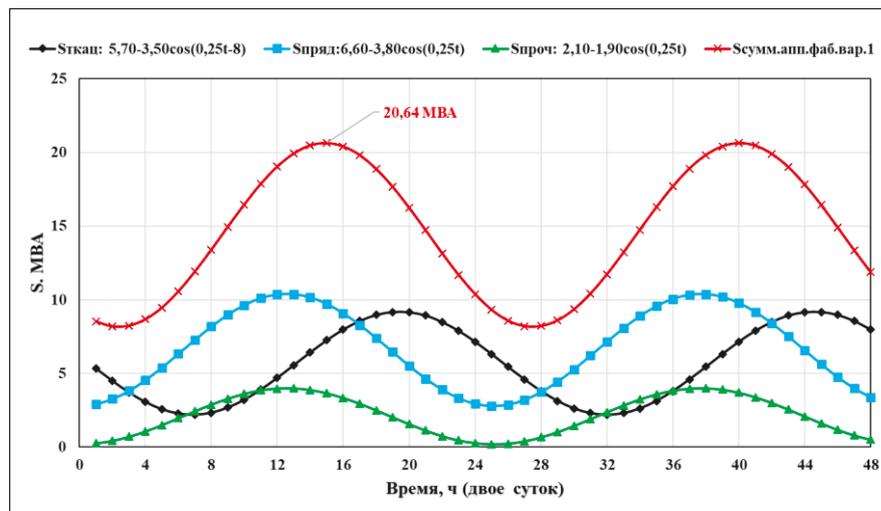


Рисунок 4.1 – Аппроксимация графиков электропотребителей Прядильно-ткацкой фабрики – вариант 1

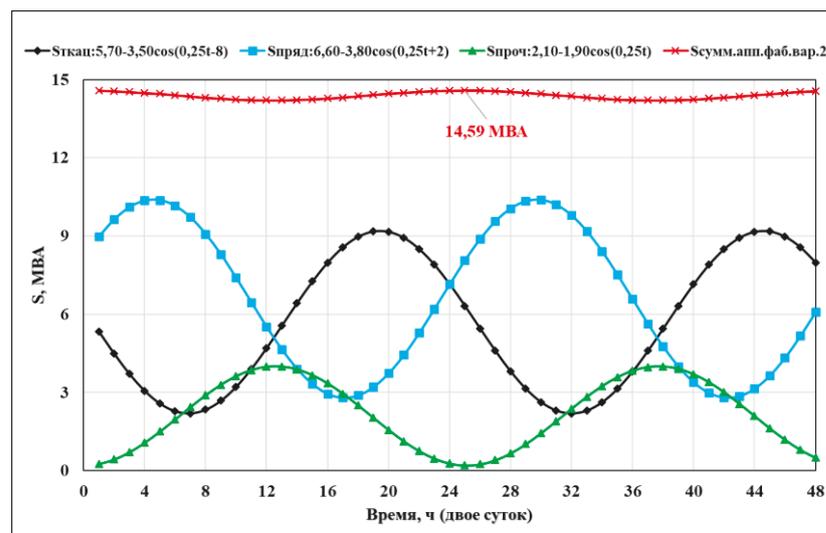


Рисунок 4.2 – Аппроксимация графиков электропотребителей Прядильно-ткацкой фабрики – вариант 2

В таблице 4.5 приведены коэффициенты корреляции для производств Пряд-ткац фабрики при исходном времени начала работы и при вар. 2.

Таблица 4.5 – Значения коэффициентов корреляции графиков нагрузки различных производств Прядельно-ткацкой фабрики – вариант 2

| Производство | Исходный |            |        | Вар. 2  |            |        |
|--------------|----------|------------|--------|---------|------------|--------|
|              | Ткацкое  | Прядильное | Прочие | Ткацкое | Прядильное | Прочие |
| Ткацкое      | 1,0      | 0,98       | 0,98   | 1,0     | -0,85      | 0,12   |
| Прядильное   | –        | 1,0        | –      | –       | 1,0        | –      |
| Прочие       | –        | 0,86       | 1,0    | –       | -0,51      | 1,0    |

Данные таблицы 4.5 показывают, что при исходном графике значения коэффициентов корреляции положительные и близки к единице, а для вар. 2 времени начала работы их значения отрицательные или близки к нулю.

Поэтому для выравнивания суммарного графика нагрузки фабрики с двухсменным режимом работы с вариацией нагрузки, примерно равной нулю, требуется выделить три производства с примерно равной нагрузкой. При двух производствах выравнивание суммарного графика качественно недостижимо.

Мощность нагрузок трансформаторов 33/11 кВ ПС «Кабун-1» является суммой мощностей нагрузки Пряд-ткац. фабрики и непромышленной зоны г. Агра.

Для сохранения потребления ЭЭ и постоянства технологического процесса (при равных средних мощностях нагрузки) снизить величину максимальной мощности нагрузок представляется возможным при таком режиме работы электропотребителей, когда вид группового графика, являющегося суммой исследуемых графиков, будет иметь минимальную неравномерность, то есть – минимальные значения дисперсии и вариации нагрузок.

Уменьшение величины дисперсии суммарного графика мощности нагрузки достигается уменьшением величины корреляционной составляющей дисперсии, то есть изменением знака удвоенной суммы корреляционных моментов.

При этом необходимо задать сдвиг между моментами включения в работу отдельных электропотребителей, который приведет к снижению до минимального значения дисперсии суммарного графика мощности нагрузки.

Минимальное (предельное) значение дисперсии суммарного графика нагрузок наблюдается в случае, если величина суммы дисперсий индивидуальных графиков нагрузок равна отрицательной величине удвоенной суммы корреляционных моментов.

В таком случае значение суммарной дисперсии в пределе стремится к нулю и данный вариант рассматривается предельным при выравнивании графика нагрузок и представления его в постоянном виде. В таблицах 4.6, 4.7 и 4.8 приведены результаты расчетов параметров аппроксимированных графиков полной мощности нагрузок с учетом КУ; вар. 1; вар. 2.

Суммарная полная мощность нагрузок трансформаторов 33/11 кВ ПС «Кабун-1» с учетом КУ; вар. 1; вар. 2 вычисляется по выражению

$$\begin{aligned} S_{\text{сумм.апп.Каб.комп}} &= S_{\text{апп.ком-быт}} + S_{\text{сумм.апп.фаб.комп}}; \\ S_{\text{сумм.апп.Каб.вар.1}} &= S_{\text{апп.ком-быт}} + S_{\text{сумм.апп.фаб.вар.1}}; \\ S_{\text{сумм.апп.Каб.вар.2}} &= S_{\text{апп.ком-быт}} + S_{\text{сумм.апп.фаб.вар.2}}; \\ S_{\text{сумм.Каб.вар.2}} &= S_{\text{исх.ком-быт}} + S_{\text{сумм.апп.фаб.вар.2}}, \end{aligned} \quad (4.2)$$

где  $S_{\text{сумм.апп.фаб.вар.1,2}}$  – суммарный аппроксимированный график полной мощности нагрузок Пряд-ткац. фабрики для первого и второго варианта соответственно;  $(S_{\text{исх.ком-быт}}, S_{\text{апп.ком-быт}})$  – исходный и аппроксимированный график полной мощности нагрузок трансформаторов коммунально-бытовых потребителей соответственно;  $(S_{\text{сумм.апп.Каб.вар.1,2}}, S_{\text{сумм.Каб.вар.1,2}})$  – суммарный аппроксимированный и расчетный графики полной мощности нагрузок трансформаторов 33/11 кВ ПС «Кабун-1» для первого и второго варианта.

Результаты расчетов представлены в таблицах 4.6; 4.7; 4.8; 4.9.

Таблица 4.6 – Аппроксимированные значения полной мощности нагрузок трансформаторов 33/11 кВ ПС «Кабун-1» с учётом КУ Прядильно-ткацкой фабрики

| Время,<br>ч | $S_{\text{анн.ком-быт.}}$ :<br>15-<br>$7\cos(0,5t+5)$ | $S_{\text{ткац.}}$ :<br>5,7-<br>$3,5\cos(0,25t)$ | $S_{\text{пряд.}}$ :<br>6,6-<br>$3,8\cos(0,25t)$ | $S_{\text{проч.}}$ :<br>2,1-<br>$1,9\cos(0,25t)$ | $S_{\text{сумм.анн.Каб.комп,}}$<br>МВА | $S_{\text{сумм.исх.Каб.комп,}}$<br>МВА |
|-------------|---|--|--|--|--|--|
| 1           | 10,04   | 2,31   | 2,92   | 0,26   | 15,53                                  | 14                                     |
| 2           | 8,28  | 2,63   | 3,27   | 0,43   | 14,61                                  | 14,2                                   |
| 3           | 8,16  | 3,14   | 3,82   | 0,71   | 15,83                                  | 14,5                                   |
| 4           | 9,72  | 3,81   | 4,55   | 1,07   | 19,15                                  | 14,8                                   |
| 5           | 12,57   | 4,6  | 5,4  | 1,5  | 24,07                                  | 18                                     |
| 6           | 16,02   | 5,45   | 6,33   | 1,97   | 29,77                                  | 28,5                                   |
| 7           | 19,21   | 6,32   | 7,28   | 2,44   | 35,25                                  | 35                                     |
| 8           | 21,38   | 7,16   | 8,18   | 2,89   | 39,61                                  | 38                                     |
| 9           | 21,98   | 7,9  | 8,99   | 3,29   | 42,16                                  | 42                                     |
| 10          | 20,87   | 8,5  | 9,64   | 3,62   | 42,63                                  | 41                                     |
| 11          | 18,33   | 8,94   | 10,11  | 3,86   | 41,24                                  | 36                                     |
| 12          | 14,97   | 9,16   | 10,36  | 3,98   | 38,47                                  | 34,8                                   |
| 13          | 11,62   | 9,18   | 10,38  | 3,99   | 35,17                                  | 35                                     |
| 14          | 9,09  | 8,98   | 10,16  | 3,88   | 32,11                                  | 35,5                                   |
| 15          | 8,02  | 8,57   | 9,72   | 3,66   | 29,97                                  | 34                                     |
| 16          | 8,65  | 7,99   | 9,08   | 3,34   | 29,06                                  | 31                                     |
| 17          | 10,84   | 7,26   | 8,3  | 2,95   | 29,35                                  | 30                                     |
| 18          | 14,04   | 6,44   | 7,4  | 2,5  | 30,38                                  | 32,5                                   |
| 19          | 17,48   | 5,57   | 6,46   | 2,03   | 31,54                                  | 35                                     |
| 20          | 20,32   | 4,71   | 5,52   | 1,56   | 32,11                                  | 37                                     |
| 21          | 21,85   | 3,91   | 4,65   | 1,13   | 31,54                                  | 33,5                                   |
| 22          | 21,7  | 3,22   | 3,91   | 0,75   | 29,58                                  | 32,5                                   |
| 23          | 19,92   | 2,69   | 3,33   | 0,46   | 26,4                                   | 18                                     |
| 24          | 16,93   | 2,34   | 2,95   | 0,28   | 22,5                                   | 14                                     |

Таблица 4.7 – Аппроксимированные значения полной мощности нагрузок трансформаторов 33/11 кВ ПС «Кабун-1» – вариант 1

| Время, ч | $S_{\text{ант.ком-быт.:15-}} 7\cos(0,5t+5)$ | $S_{\text{ткац.:5,7-}} 3,5\cos(0,25t-8)$ | $S_{\text{пряд.:6,6-}} 3,8\cos(0,25t)$ | $S_{\text{проч.:2,1-}} 1,9\cos(0,25t)$ | $S_{\text{сумм.ант.Каб.вар.1}} \text{МВА}$ |
|----------|---|--|--|--|--|
| 1        | 10,04                                       | 5,34                                     | 2,92                                   | 0,26                                   | 18,56                                      |
| 2        | 8,28  | 4,49                                     | 3,27                                   | 0,43                                   | 16,47                                      |
| 3        | 8,16  | 3,71                                     | 3,82                                   | 0,71                                   | 16,4                                       |
| 4        | 9,72  | 3,06                                     | 4,55                                   | 1,07                                   | 18,4                                       |
| 5        | 12,57                                       | 2,57                                     | 5,4                                    | 1,5                                    | 22,04                                      |
| 6        | 16,02                                       | 2,28                                     | 6,33                                   | 1,97                                   | 26,6                                       |
| 7        | 19,21                                       | 2,2                                      | 7,28                                   | 2,44                                   | 31,13                                      |
| 8        | 21,38                                       | 2,34                                     | 8,18                                   | 2,89                                   | 34,79                                      |
| 9        | 21,98                                       | 2,69                                     | 8,99                                   | 3,29                                   | 36,95                                      |
| 10       | 20,87                                       | 3,22                                     | 9,64                                   | 3,62                                   | 37,35                                      |
| 11       | 18,33                                       | 3,91                                     | 10,11                                  | 3,86                                   | 36,21                                      |
| 12       | 14,97                                       | 4,71                                     | 10,36                                  | 3,98                                   | 34,02                                      |
| 13       | 11,62                                       | 5,57                                     | 10,38                                  | 3,99                                   | 31,56                                      |
| 14       | 9,09  | 6,44                                     | 10,16                                  | 3,88                                   | 29,57                                      |
| 15       | 8,02  | 7,26                                     | 9,72                                   | 3,66                                   | 28,66                                      |
| 16       | 8,65  | 7,99                                     | 9,08                                   | 3,34                                   | 29,06                                      |
| 17       | 10,84                                       | 8,57                                     | 8,3                                    | 2,95                                   | 30,66                                      |
| 18       | 14,04                                       | 8,98                                     | 7,4                                    | 2,5                                    | 32,92                                      |
| 19       | 17,48                                       | 9,18                                     | 6,46                                   | 2,03                                   | 35,15                                      |
| 20       | 20,32                                       | 9,16                                     | 5,52                                   | 1,56                                   | 36,56                                      |
| 21       | 21,85                                       | 8,94                                     | 4,65                                   | 1,13                                   | 36,57                                      |
| 22       | 21,7  | 8,5                                      | 3,91                                   | 0,75                                   | 34,86                                      |
| 23       | 19,92                                       | 7,9                                      | 3,33                                   | 0,46                                   | 31,61                                      |
| 24       | 16,93                                       | 7,16                                     | 2,95                                   | 0,28                                   | 27,32                                      |

Таблица 4.8 – Аппроксимированные значения полной мощности нагрузок трансформаторов 33/11 кВ ПС «Кабун-1» – вариант 2

| Время, ч | $S_{\text{апп.ком-быт.:15-}} 7\cos(0,5t+5)$ | $S_{\text{ткац.:5,7-}} 3,5\cos(0,25t-8)$ | $S_{\text{пряд.:6,6-}} 3,8\cos(0,25t+2)$ | $S_{\text{проч.:2,1-}} 1,9\cos(0,25t)$ | $S_{\text{сумм.апп.Каб.вар.2}} \text{МВА}$ |
|----------|---|--|--|--|--|
| 1        | 10,04                                       | 5,34                                     | 8,99                                     | 0,26                                   | 24,63                                      |
| 2        | 8,28  | 4,49                                     | 9,64                                     | 0,43                                   | 22,84                                      |
| 3        | 8,16  | 3,71                                     | 10,11                                    | 0,71                                   | 22,69                                      |
| 4        | 9,72  | 3,06                                     | 10,36                                    | 1,07                                   | 24,21                                      |
| 5        | 12,57                                       | 2,57                                     | 10,38                                    | 1,5                                    | 27,02                                      |
| 6        | 16,02                                       | 2,28                                     | 10,16                                    | 1,97                                   | 30,43                                      |
| 7        | 19,21                                       | 2,2                                      | 9,72                                     | 2,44                                   | 33,57                                      |
| 8        | 21,38                                       | 2,34                                     | 9,08                                     | 2,89                                   | 35,69                                      |
| 9        | 21,98                                       | 2,69                                     | 8,3                                      | 3,29                                   | 36,26                                      |
| 10       | 20,87                                       | 3,22                                     | 7,4                                      | 3,62                                   | 35,11                                      |
| 11       | 18,33                                       | 3,91                                     | 6,46                                     | 3,86                                   | 32,56                                      |
| 12       | 14,97                                       | 4,71                                     | 5,52                                     | 3,98                                   | 29,18                                      |
| 13       | 11,62                                       | 5,57                                     | 4,65                                     | 3,99                                   | 25,83                                      |
| 14       | 9,09  | 6,44                                     | 3,91                                     | 3,88                                   | 23,32                                      |
| 15       | 8,02  | 7,26                                     | 3,33                                     | 3,66                                   | 22,27                                      |
| 16       | 8,65  | 7,99                                     | 2,95                                     | 3,34                                   | 22,93                                      |
| 17       | 10,84                                       | 8,57                                     | 2,8                                      | 2,95                                   | 25,16                                      |
| 18       | 14,04                                       | 8,98                                     | 2,89                                     | 2,5                                    | 28,41                                      |
| 19       | 17,48                                       | 9,18                                     | 3,21                                     | 2,03                                   | 31,9                                       |
| 20       | 20,32                                       | 9,16                                     | 3,74                                     | 1,56                                   | 34,78                                      |
| 21       | 21,85                                       | 8,94                                     | 4,44                                     | 1,13                                   | 36,36                                      |
| 22       | 21,7  | 8,5                                      | 5,28                                     | 0,75                                   | 36,23                                      |
| 23       | 19,92                                       | 7,9                                      | 6,21                                     | 0,46                                   | 34,49                                      |
| 24       | 16,93                                       | 7,16                                     | 7,15                                     | 0,28                                   | 31,52                                      |

Таблица 4.9 – Результаты расчетов полной мощности нагрузок трансформаторов  
33/11 кВ ПС «Кабун-1» – вариант 2

| Время, ч                | $S_{\text{сумм.исх.Каб.комп.}}$<br>МВА | $S_{\text{сумм.атт.фаб.вар.2}}$<br>МВА | $S_{\text{исх.ком-быт}}$<br>МВА | $S_{\text{сумм.Каб.вар.2}}$<br>МВА |
|-------------------------|--|--|---------------------------------|------------------------------------|
| 1                       | 14                                     | 14,59                                  | 7,4                             | 21,99                              |
| 2                       | 14,2                                   | 14,56                                  | 7,4                             | 21,96                              |
| 3                       | 14,5                                   | 14,53                                  | 7,4                             | 21,93                              |
| 4                       | 14,8                                   | 14,49                                  | 7,5                             | 21,99                              |
| 5                       | 18                                     | 14,46                                  | 10                              | 24,46                              |
| 6                       | 28,5                                   | 14,41                                  | 18                              | 32,41                              |
| 7                       | 35                                     | 14,36                                  | 20                              | 34,36                              |
| 8                       | 38                                     | 14,31                                  | 20                              | 34,31                              |
| 9                       | 42                                     | 14,28                                  | 22                              | 36,28                              |
| 10                      | 41                                     | 14,24                                  | 20                              | 34,24                              |
| 11                      | 36                                     | 14,22                                  | 15                              | 29,22                              |
| 12                      | 34,8                                   | 14,21                                  | 13                              | 27,21                              |
| 13                      | 35                                     | 14,21                                  | 12                              | 26,21                              |
| 14                      | 35,5                                   | 14,23                                  | 12                              | 26,23                              |
| 15                      | 34                                     | 14,25                                  | 11                              | 25,25                              |
| 16                      | 31                                     | 14,28                                  | 10                              | 24,28                              |
| 17                      | 30                                     | 14,32                                  | 12,5                            | 26,82                              |
| 18                      | 32,5                                   | 14,37                                  | 17                              | 31,37                              |
| 19                      | 35                                     | 14,42                                  | 21                              | 35,42                              |
| 20                      | 37                                     | 14,47                                  | 23                              | 37,47                              |
| 21                      | 33,5                                   | 14,5                                   | 22                              | 36,5                               |
| 22                      | 32,5                                   | 14,54                                  | 21,9                            | 36,44                              |
| 23                      | 18                                     | 14,57                                  | 10                              | 24,57                              |
| 24                      | 14                                     | 14,58                                  | 7                               | 21,58                              |
| $S_{\text{сред}}$ , МВА | 29,12                                  | 14,39                                  | 14,46                           | 28,85                              |
| $S_{\text{макс}}$ , МВА | 42                                     | 14,59                                  | 23                              | 37,47                              |
| $K_{\text{зн}}$         | 0,69                                   | 0,99                                   | 0,63                            | 0,77                               |
| $S_{\text{эфф}}$ , МВА  | 30,60                                  | 14,39                                  | 21,90                           | 29,46                              |
| $\sigma_S$ , МВА        | 9,32                                   | 0,13                                   | 7,85                            | 5,62                               |
| $\gamma_S$              | 0,32                                   | 0,01                                   | 0,54                            | 0,19                               |

На рисунке 4.3, 4.4, 4.5 и 4.6 показаны графики нагрузок трансформаторов напряжением 33/11 кВ ПС «Кабун-1» и их слагаемые – в реальном и аппроксимированном виде – для различных случаев времени начала работы производств [98] Пряд-ткац. фабрики.

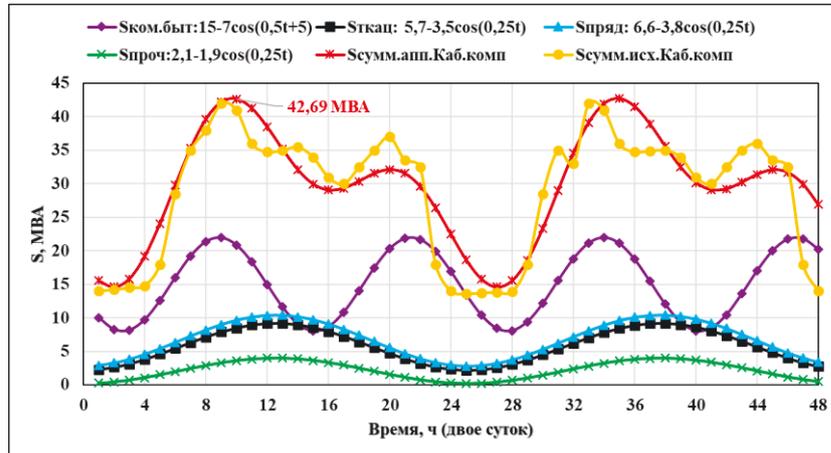


Рисунок 4.3 – Аппроксимированные графики полной мощности нагрузок электропотребителей ПС «Кабун-1» с учётом КУ на Прядильно-ткацкой фабрике

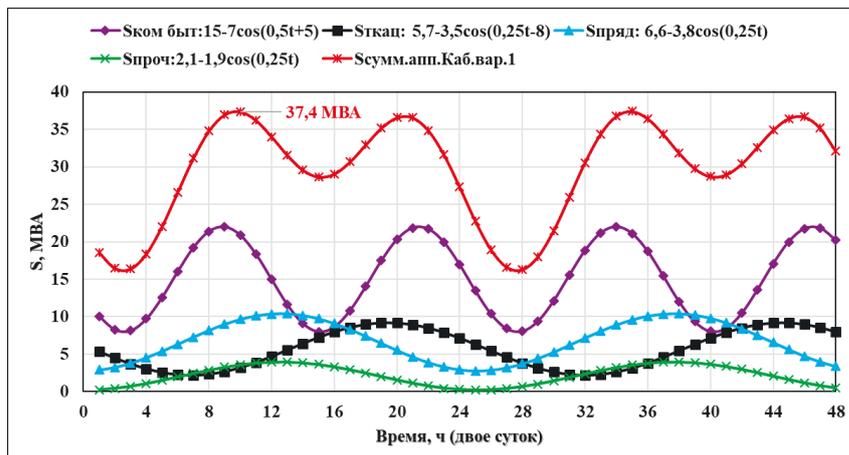


Рисунок 4.4 – Аппроксимированные графики нагрузок электропотребителей ПС «Кабун-1» – вариант 1

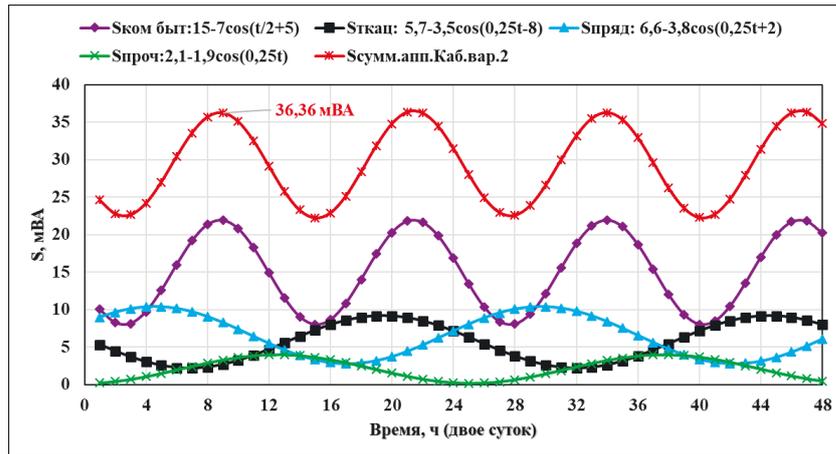


Рисунок 4.5 – Аппроксимированные графики нагрузок электропотребителей ПС «Кабун-1» – вариант 2

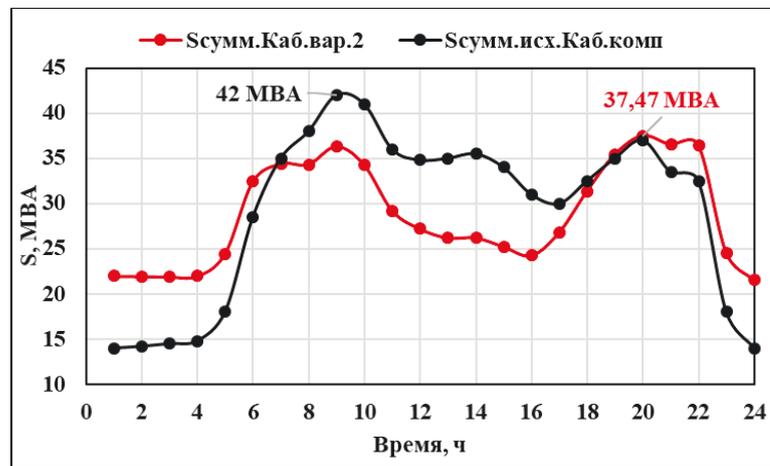


Рисунок 4.6 – Исходный и расчетный графики нагрузок электропотребителей трансформаторов 33/11 кВ ПС «Кабун-1» – вариант 2

Значения исходных и аппроксимированных графиков нагрузок для варианта 1 и 2 представлены в таблице 4.10.

Таблица 4.10 – Статистические параметры исходных и аппроксимированных графиков нагрузок трансформаторов 33/11 кВ ПС «Кабун-1»: вариант 1 и 2

| Показатель                     | $S_{\text{сумм. апп. Каб. комп}}$ | $S_{\text{сумм. апп. Каб. вар. 1}}$ | $S_{\text{сумм. исх. Каб. комп}}$ | $S_{\text{сумм. апп. Каб. вар. 2}}$ | $S_{\text{сумм. Каб. вар. 2}}$ |
|--------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| $S_{\text{сред}}, \text{ МВА}$ | 29,81                             | 29,60                               | 29,12                             | 29,38                               | 28,85                          |
| $S_{\text{макс}}, \text{ МВА}$ | 42,69                             | 37,40                               | 42                                | 36,36                               | 37,47                          |
| $K_{\text{зн}}$                | 0,70                              | 0,79                                | 0,69                              | 0,81                                | 0,77                           |
| $S_{\text{эфф}}, \text{ МВА}$  | 30,88                             | 30,29                               | 30,60                             | 29,74                               | 29,46                          |
| $\sigma_S, \text{ МВА}$        | 8,41                              | 6,92                                | 9,32                              | 5,15                                | 5,62                           |
| $\gamma_S$                     | 0,28                              | 0,23                                | 0,32                              | 0,18                                | 0,19                           |

Данные таблицы 4.10 показывают, что при вар. 2 максимальная нагрузка снижается на 4,5 МВА (42 – 37,47), а время ее наступления сдвигается с 9:30 ч при исходном варианте на 20:30 ч в вар. 2 (рисунок 4.6). Величина вариации нагрузки снижается с 0,32 при исходном варианте до 0,19 при вар. 2, то есть происходит уплотнение графика.

#### 4.3. Алгоритм оценки влияния вида графиков нагрузки на продолжительность срока эксплуатации трансформаторов подстанции «Кабун-1» – вариант 2

Алгоритм оценки срока службы трансформаторов ПС «Кабун-1» с учетом сдвига времени начала работы (вар.2) включает в себя определение: суммарной полной мощности нагрузок ПС «Кабун-1» ( $S_{\text{сумм. Каб. вар. 2}}$ ), коэффициентов загрузки трансформаторов ( $K_{\text{зг. вар. 2}}$ ) и температуры нагрева обмоток ( $t_{\text{обм. вар. 2}}$ ).

Коэффициент загрузки трансформаторов 33/11 кВ ПС «Кабун-1» для вар.2 вычисляется по выражению

$$\begin{aligned}
 K_{\text{зг. вар. 2}} &= \frac{S_{\text{сумм. Каб. вар. 2}}}{S_{\text{ном}}}; \\
 t = 1 \text{ ч} &\Rightarrow K_{\text{зг}} = \frac{21,99}{40} = 0,55; \\
 t = 2 \text{ ч} &\Rightarrow K_{\text{зг}} = \frac{21,96}{40} = 0,54; \\
 &\vdots
 \end{aligned}
 \tag{4.3}$$

С помощью (2.61), относительный срок службы трансформаторов 33/11 кВ ПС «Кабун-1» – вар.2, вычисляется по выражению

$$\begin{aligned}
 T_{с.сл.вар.2}^* &= -1,46K_{зг.вар.2}^2 - 0,5K_{зг.вар.2} + 1,83; \\
 t = 1 \text{ ч} &\Rightarrow T_{с.сл}^* = -1,46(0,55)^2 - 0,5(0,55) + 1,83 = 1,35; \\
 t = 2 \text{ ч} &\Rightarrow T_{с.сл}^* = -1,46(0,55)^2 - 0,5(0,55) + 1,83 = 1,35. \\
 &\vdots
 \end{aligned}
 \tag{4.4}$$

Расчетные значения представлены в таблице 4.11.

Таблица 4.11 – Расчетные значения коэффициентов загрузки и соответствующего относительного срока службы трансформаторов ПС «Кабун-1» – вариант 2

| Время, ч | $S_{сумм.Каб.вар.2} (S_{ном}=40 \text{ МВА})$ | $K_{зг.вар.2}$ | $T_{с.сл.вар.2}^*$ |
|----------|---|----------------|--------------------|
| 1        | 21,99   | 0,55           | 1,35               |
| 2        | 21,96   | 0,55           | 1,35               |
| 3        | 21,93   | 0,55           | 1,3                |
| 4        | 21,99   | 0,55           | 1,25               |
| 5        | 24,46   | 0,61           | 1,15               |
| 6        | 32,41   | 0,81           | 0,65               |
| 7        | 34,36   | 0,86           | 0,55               |
| 8        | 34,31   | 0,86           | 0,5                |
| 9        | 36,28   | 0,91           | 0,33               |
| 10       | 34,24   | 0,86           | 0,55               |
| 11       | 29,22   | 0,73           | 0,95               |
| 12       | 27,21   | 0,68           | 1,15               |
| 13       | 26,21   | 0,66           | 1,2                |
| 14       | 26,23   | 0,66           | 1,15               |
| 15       | 25,25   | 0,63           | 1,1                |
| 16       | 24,28   | 0,61           | 1,15               |
| 17       | 26,82   | 0,67           | 1,05               |
| 18       | 31,37   | 0,78           | 0,8                |

|    |       |      |      |
|----|-------|------|------|
| 19 | 35,42 | 0,89 | 0,55 |
| 20 | 37,47 | 0,94 | 0,32 |
| 21 | 36,5  | 0,91 | 0,35 |
| 22 | 36,44 | 0,91 | 0,32 |
| 23 | 24,57 | 0,61 | 1,27 |
| 24 | 21,58 | 0,54 | 1,35 |

На рисунке 4.7 и 4.8 представлены результаты расчетов коэффициентов загрузки и относительного срока службы исследуемых трансформаторов для вар. 2.

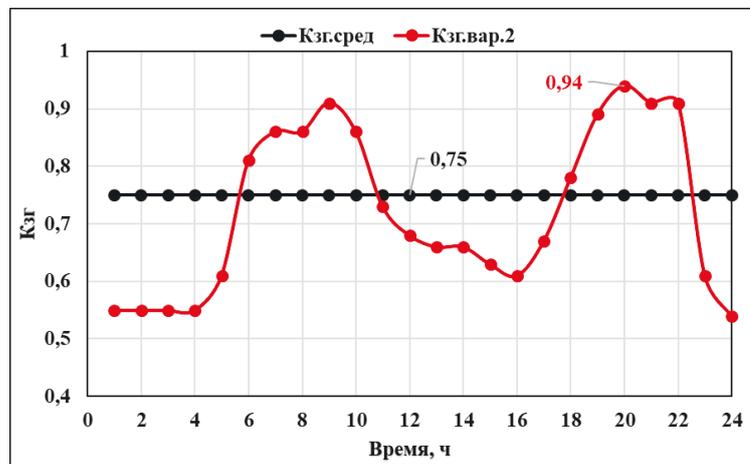


Рисунок 4.7 – Графические зависимости суточных значений коэффициента загрузки трансформаторов ПС «Кабун-1» – вариант 2

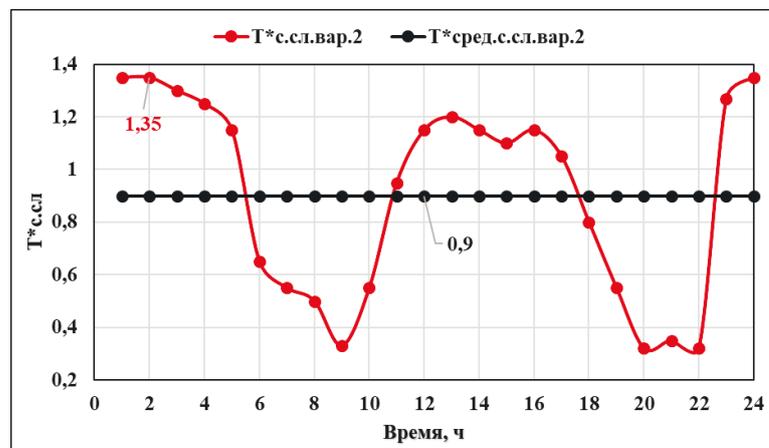


Рисунок 4.8 – Графические зависимости относительного срока службы трансформаторов ПС «Кабун-1» – вариант 2

На рисунке 4.7 показано, что значение среднего коэффициента загрузки трансформаторов – вар. 2, равен 0,75, предельные значения: 0,54 – 0,94.

Вид графика (рисунок 4.8) показывает, что значение среднего относительного срока службы трансформаторов (вар. 2) и при условиях, обозначенных в главе 2, равно 0,9, т.е. меньше желаемого, т.к. в интервале наибольших нагрузок значение температуры нагревания обмотки выше допустимого (85 °С).

С помощью (2.60) определим значения температуры нагревания обмоток исследуемых трансформаторов (вар. 2).

$$\begin{aligned}
 t_{\text{обм.вар.2}} &= \frac{11,79 - T_{\text{с.сл.вар.2}}^*}{0,125}; \\
 t = 1 \text{ ч} \Rightarrow t_{\text{обм}} &= \frac{11,79 - 1,35}{0,125} = 83,52 \text{ °С}; \\
 t = 2 \text{ ч} \Rightarrow t_{\text{обм}} &= \frac{11,79 - 1,35}{0,125} = 83,52 \text{ °С}. \\
 &\vdots
 \end{aligned}
 \tag{4.5}$$

Расчетные значения представлены в таблице 4.12.

Таблица 4.12 – Расчетные значения температуры нагревания обмоток трансформаторов ПС «Кабун-1» – вариант 2

| Время, ч | $t_{\text{обм.исх}} \text{ (°С)}$ | $T_{\text{с.сл.вар.2}}^*$ | $t_{\text{обм. вар.2}} \text{ (°С)}$ |
|----------|-----------------------------------|---------------------------|--------------------------------------|
| 1        | 83,5                              | 1,35                      | 83,52                                |
| 2        | 83,5                              | 1,35                      | 83,52                                |
| 3        | 83,5                              | 1,3                       | 83,92                                |
| 4        | 83,5                              | 1,25                      | 84,32                                |
| 5        | 83,5                              | 1,15                      | 85,12                                |
| 6        | 88                                | 0,65                      | 89,12                                |
| 7        | 93,5                              | 0,55                      | 89,92                                |
| 8        | 95                                | 0,5                       | 90,32                                |

Продолжение таблицы 4.12

|      |      |      |       |
|------|------|------|-------|
| 9    | 97,5 | 0,33 | 91,68 |
| 10   | 96,5 | 0,55 | 89,92 |
| 11   | 93,5 | 0,95 | 86,72 |
| 12   | 93,5 | 1,15 | 85,12 |
| 13   | 93,5 | 1,2  | 84,72 |
| 14   | 93,5 | 1,15 | 85,12 |
| 15   | 93,5 | 1,1  | 85,52 |
| 16   | 92   | 1,15 | 85,12 |
| 17   | 92   | 1,05 | 85,92 |
| 18   | 92   | 0,8  | 87,92 |
| 19   | 92   | 0,55 | 89,92 |
| 20   | 92   | 0,32 | 91,76 |
| 21   | 92   | 0,35 | 91,52 |
| 22   | 92   | 0,32 | 91,76 |
| 23   | 84   | 1,27 | 84,16 |
| 24   | 84   | 1,35 | 83,52 |
| Сред | 90,3 | 0,9  | 87    |
| Макс | 97,5 | 1,35 | 91,76 |
| Мнн  | 83,5 | 0,32 | 83,52 |

На рисунке 4.9 показаны графические зависимости суточных значений температуры нагрева обмоток исследуемых трансформаторов по данным таблицы 4.12 для различных вариантов нагрузки.

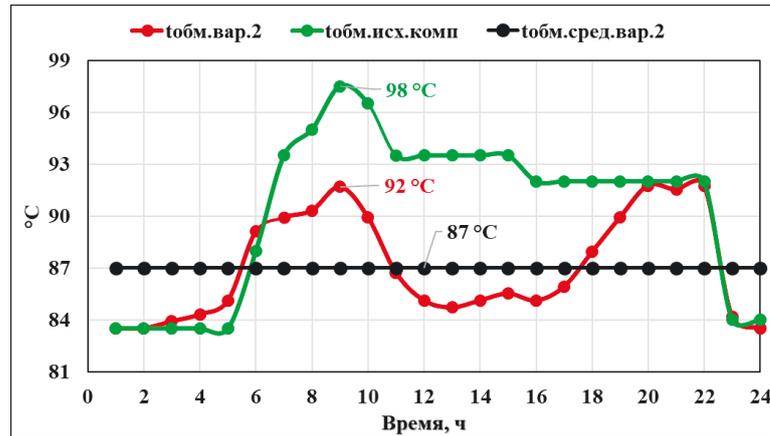


Рисунок 4.9 – Графические зависимости суточных значений температуры нагрева обмотки трансформаторов ПС «Кабун-1» – исходный и вариант 2

Графики (рисунок 4.9) показывают, что все значения температуры нагрева обмотки выше допустимой 85 °C [98, 99].

В таблице 4.13 представлен сравнительный анализ параметров нагрева обмоток и срока службы трансформаторов ПС «Кабун-1» при исходном и вар. 2.

Таблица 4.13 – Значения температуры нагрева обмоток и срока службы трансформаторов ПС «Кабун-1» для различных вариантов графиков нагрузок

| Основные режимы электропотребления нагрузками | $K_{зг.сред}$ | $K_{зг.макс}$ | $t_{обм.сред}$ | $t_{обм.макс}$ | $T_{с.сл}^*$ |
|---|---------------|---------------|----------------|----------------|--------------|
| 1. Полной мощности нагрузки                   | 0,8           | 1,18          | 92 °C          | 103 °C         | 0,5          |
| 2.С учетом КУ                                 | 0,75          | 1,05          | 90 °C          | 98 °C          | 0,63         |
| 3. Вар.2                                      | 0,75          | 0,94          | 87 °C          | 92 °C          | 0,9          |

Данные таблицы 4.13 показывают, что значение срока службы исследуемых трансформаторов при графике нагрузок для вар. 2 выравнивания существенно больше (примерно на 30 %) 0,63→0,9, чем для исходного графика нагрузок с учётом КУ.

#### **4.4. Анализ и исследование способов выравнивания графиков нагрузки электропотребителей, получающих питание от трансформаторов подстанции «Кабун-1» – вариант 3**

Из п.4.3 следует, что значение среднего относительного срока службы трансформаторов (вар. 2) равно 0,9, так как в режиме максимальных нагрузок температура нагрева обмотки выше допустимой величины.

Поэтому возможно проанализировать дополнительные мероприятия для выравнивания графиков нагрузок трансформаторов при изменении времени начала работы на некоторых мелких промышленных предприятиях г. Адра.

При третьем варианте (вар. 3) выравнивание графиков нагрузок трансформаторов 33/11 кВ ПС «Кабун-1» включает следующие мероприятия:

1. Установка батарей конденсаторов на стороне низшего напряжения трансформаторов Пряд-ткац. фабрики;
2. Сдвиг времени начала работы ткацкого производства Пряд-ткац. фабрики с 5:30 ч на 12:30 ч (вар. 1);
3. Сдвиг времени начала работы прядильного производства Пряд-ткац. фабрики с 5:30 ч на 22:30 ч (вар. 2);
4. Сдвиг времени начала работы Механической мастерской с 7:30 ч на 23:30ч;
5. Сдвиг времени начала работы Завода соков с 8:30 ч на 0:30 ч.

Получение экономического эффекта от сдвига времени начала работы обусловлено более низким ночным тарифом на электроэнергию – дневной = 0,048\$; вечерний = 0,064\$; ночной = 0,040\$.

В ночную смену зарплата эксплуатационного персонала выше, чем в дневную, на 10%, а также вводятся дополнительные льготы для работников (санаторий, льготная пенсия, дополнительные дни к отпуску, сокращение продолжительности ночной смены).

#### 4.5. Параметры графиков нагрузок трансформаторов 33/11 кВ подстанции «Кабун-1» – вариант 3

Рассматриваемые варианты учитывают несовпадение максимумов данных нагрузок во времени максимальные мощности нагрузок механической мастерской и Завода по производству соков соответствует минимальным коммунально-бытовым нагрузкам. Данные таблицы 4.14 показывают оптимальные варианты времени начала работы первой смены для механической мастерской 23:30 ч, для Завода по производству соков 00:30 ч.

Таблица 4.14 – Варианты начала работы Механической мастерской и Завода соков и времена максимумов их нагрузок

| Сдвиг времени            | Механическая мастерская (1-сменное) |         |         | Завод по производству соков (2х-сменное) |         |         |
|--------------------------|-------------------------------------|---------|---------|--|---------|---------|
|                          | Исходный                            | Сдвиг.1 | Сдвиг.2 | Исходный                                 | Сдвиг.1 | Сдвиг.2 |
| Начало 1-ой смены, ч     | 7:30 ч                              | 12:30 ч | 23:30 ч | 8:30 ч                                   | 14:30 ч | 0:30 ч  |
| Время 1-ого максимума, ч | 8:30 ч                              | 13:30 ч | 0:30 ч  | 10:30 ч                                  | 16:30 ч | 2:30 ч  |
|                          | 13:30 ч                             | 18:30 ч | 5:30 ч  | 12:30 ч                                  | 18:30 ч | 4:30 ч  |
| Время 2-ого максимума, ч | —                                   | —       | —       | 20:30 ч                                  | 00:30 ч | 12:30 ч |
|                          | —                                   | —       | —       | 22:30 ч                                  | 02:30 ч | 02:30 ч |

На рисунке 4.10, 4.11, 4.12 представлены графики нагрузок Завода соков, Мех. мастерской и Ком-быт. электропотребителей – исходный (п.2.2.1) и вар. 3.

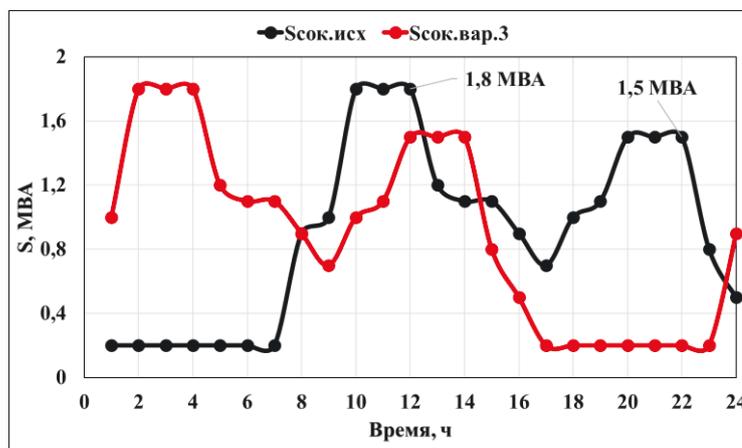


Рисунок 4.10 – Графики полной мощности нагрузок Завода соков – исходный и вариант 3

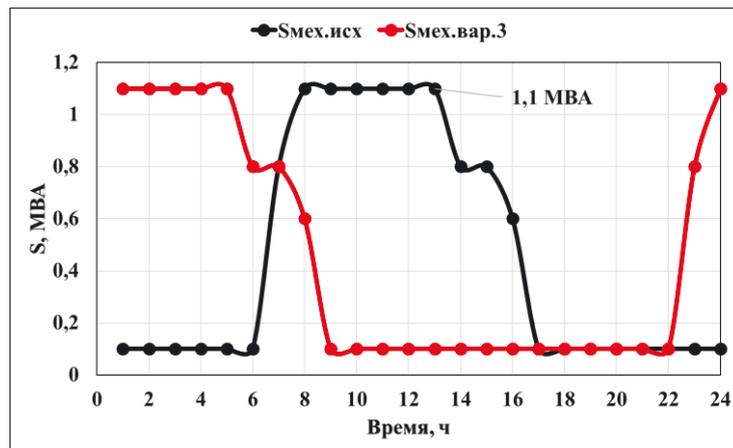


Рисунок 4.11 – Графики полной мощности нагрузок Механической мастерской – исходный и вариант 3

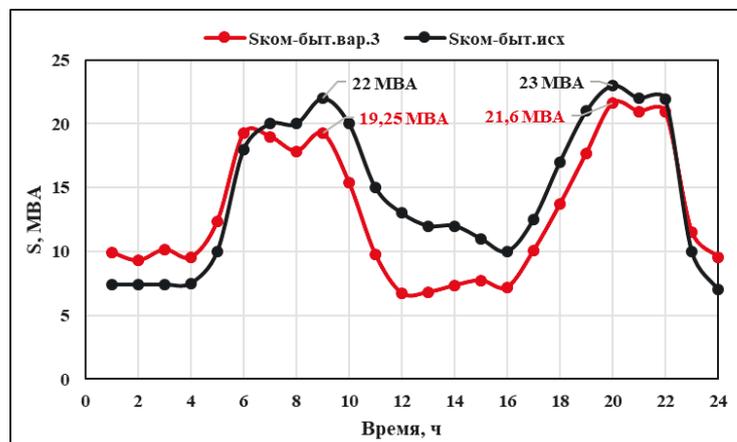


Рисунок 4.12 – Графики полной мощности нагрузок коммунально-бытовых потребителей – исходный и вариант 3

Рисунок 4.12 показывает, что:

1. исследовано взаимное влияние сдвига времени начала работы Мех. мастерской и Завода соков на суммарную величину Ком-быт. нагрузки;
2. наибольшее значение суммарного графика полной мощности Ком-быт. нагрузки снижается утром на 1,8 МВА (22,0 – 19,25), а вечером на 1,6 МВА (23 – 21,6) МВА.

На рисунке 4.13 показаны графики электропотребителей Пряд-ткац. фабрики – вар. 3, а их параметры представлены в таблице 4.15.

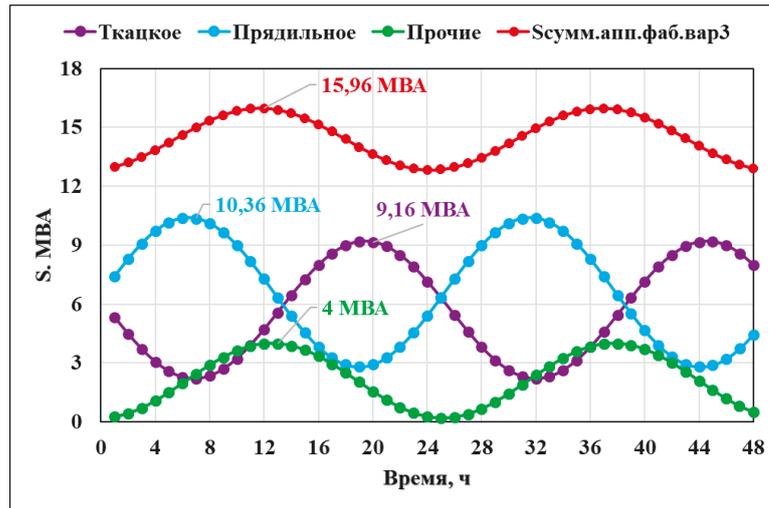


Рисунок 4.13 – Аппроксимация графиков электропотребителей Прядильно-ткацкой фабрики – вариант 3

Таблица 4.15 – Параметры графиков производств и суммарного Прядильно-ткацкой фабрики – вариант 3

| Показатель              | Ткацкое | Прядильное              | Прочие                  | $S_{\text{сумм. апп. фаб. вар.3}}$ |
|-------------------------|---------|-------------------------|-------------------------|------------------------------------|
|                         |         | $5,7-3,5 \cos(0,25t-8)$ | $6,6-3,8 \cos(0,25t-5)$ |                                    |
| Начало работы, ч        | 12:30 ч | 22:30 ч                 | 8:30                    |                                    |
| $S_{\text{сред}}$ , МВА | 5,63    | 6,63                    | 2,19                    | 14,51                              |
| $S_{\text{макс}}$ , МВА | 9,16    | 10,36                   | 4                       | 15,96                              |

Суммарная полная мощность нагрузок 33/11 кВ ПС «Кабун-1» с учетом вар.3 вычисляется

$$S_{\text{сумм. апп. фаб. вар.3}} = S_{\text{ткац}}(j_0=-8) + S_{\text{пряд}}(j_0=-5) + S_{\text{проч}} ; \quad (4.6)$$

$$S_{\text{сумм. Каб. вар.3}} = S_{\text{ком-быт. вар.3}} + S_{\text{сок. вар.3}} + S_{\text{мех. вар.3}} + S_{\text{сумм. апп. фаб. вар.3}}$$

где  $S_{\text{ком-быт. вар.3}}$  – полная мощность нагрузок коммунально-бытовых потребителей для третьего варианта;  $S_{\text{сок. вар.3}}$  – полная мощность нагрузок Завода соков для третьего варианта;  $S_{\text{мех. вар.3}}$  – полная мощность нагрузок Механической мастерской для третьего варианта;  $S_{\text{сумм. апп. фаб. вар.3}}$  – суммарная аппроксимированная полная мощность нагрузок Пряд-ткац. фабрики для третьего варианта.

Результаты расчетов представлены в таблице 4.16.

Таблица 4.16 – Результаты расчетов полной мощности нагрузок трансформаторов  
33/11 кВ ПС «Кабун-1» – вариант 3

| Время, ч | $S_{\text{ком-быт.вар.3}}$<br>МВА | $S_{\text{мех.вар.3}}$<br>МВА | $S_{\text{сок.вар.3}}$<br>МВА | $S_{\text{сумм.апн.фаб.вар.3}}$<br>МВА | $S_{\text{сумм.Каб.вар.3}}$<br>МВА |
|----------|-----------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--|------------------------------------|
| 1        | 9,9                               | 0,1                           | 1,1                           | 13                                     | 24,1                               |
| 2        | 9,29                              | 0,1                           | 1,5                           | 13,21                                  | 24,1                               |
| 3        | 10,14                             | 0,1                           | 1,5                           | 13,51                                  | 25,25                              |
| 4        | 9,55                              | 0,1                           | 1,5                           | 13,85                                  | 25                                 |
| 5        | 12,37                             | 0,1                           | 0,8                           | 14,23                                  | 27,5                               |
| 6        | 19,27                             | 0,1                           | 0,5                           | 14,63                                  | 34,5                               |
| 7        | 19                                | 0,8                           | 0,2                           | 15                                     | 35                                 |
| 8        | 17,86                             | 1,1                           | 0,2                           | 15,34                                  | 34,5                               |
| 9        | 19,25                             | 1,1                           | 0,2                           | 15,7                                   | 36,25                              |
| 10       | 15,37                             | 1,1                           | 0,2                           | 15,83                                  | 32,5                               |
| 11       | 9,75                              | 1,1                           | 0,2                           | 15,95                                  | 27                                 |
| 12       | 6,73                              | 1,1                           | 0,2                           | 15,97                                  | 24                                 |
| 13       | 6,81                              | 1,1                           | 0,2                           | 15,89                                  | 24                                 |
| 14       | 7,33                              | 0,8                           | 0,9                           | 15,72                                  | 24,75                              |
| 15       | 7,73                              | 0,8                           | 1                             | 15,47                                  | 25                                 |
| 16       | 7,2                               | 0,6                           | 1,8                           | 15,15                                  | 24,75                              |
| 17       | 10,07                             | 0,1                           | 1,8                           | 14,78                                  | 26,75                              |
| 18       | 13,7                              | 0,1                           | 1,8                           | 14,4                                   | 30                                 |
| 19       | 17,69                             | 0,1                           | 1,2                           | 14,01                                  | 33                                 |
| 20       | 21,6                              | 0,1                           | 1,1                           | 13,4                                   | 36,2                               |
| 21       | 20,97                             | 0,1                           | 1,1                           | 13,33                                  | 35,5                               |
| 22       | 20,92                             | 0,1                           | 0,9                           | 13,08                                  | 35                                 |
| 23       | 11,54                             | 0,1                           | 0,7                           | 12,91                                  | 25,25                              |
| 24       | 9,57                              | 0,1                           | 1                             | 12,83                                  | 23,5                               |

На рисунке 4.14 показаны графики полной мощности нагрузок трансформаторов 33/11 кВ – исходный и вариант 3, а их параметры представлены в таблице 4.17.

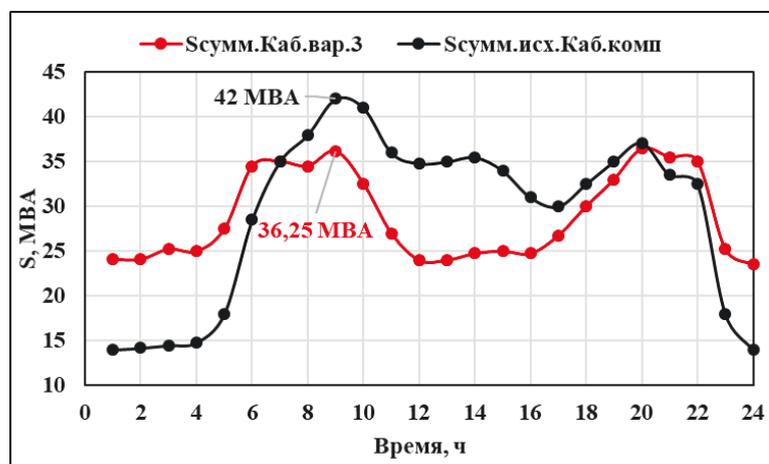


Рисунок 4.14 – Графики полной мощности нагрузок трансформаторов 33/11 кВ – исходный и вариант 3

Таблица 4.17 – Статистические параметры расчетных графиков нагрузок трансформаторов 33/11 кВ ПС «Кабун-1» – вариант 3

| Параметр                | Ком-быт. | Мех. мастерская | Завод соков | Пряд-ткац. | «Кабун-1» Вар.3 | «Кабун-1» Исходный с КУ |
|-------------------------|----------|-----------------|-------------|------------|-----------------|-------------------------|
| $S_{\text{сред}}$ , МВА | 13,05    | 0,46            | 0,90        | 14,51      | 28,92           | 29,12                   |
| $S_{\text{макс}}$ , МВА | 21,60    | 1,10            | 1,80        | 15,94      | 36,25           | 42,00                   |
| $K_{\text{зн}}$         | 0,61     | 0,42            | 0,50        | 0,91       | 0,80            | 0,69                    |
| $S_{\text{эфф}}$ , МВА  | 14,12    | 0,64            | 1,06        | 14,54      | 29,33           | 30,60                   |
| $\sigma_S$ , МВА        | 5,39     | 0,45            | 0,57        | 0,99       | 4,89            | 9,32                    |
| $\gamma_S$              | 0,41     | 0,98            | 0,63        | 0,07       | 0,17            | 0,32                    |

Для вар.3 сдвига времени начала работы наибольшая мощность нагрузки снижается на 5,75 МВА (42 – 36,25) МВА, вариация нагрузок снижается с 0,33 до 0,17. По отношению к вар.2 сдвигов времени только подразделений Пряд-ткац. фабрики, наибольшее значение снизилось ещё на 0,85 МВА (42 – 37,47). При этом

во всех вариантах среднее значение мощности нагрузок трансформаторов 33/11 кВ ПС «Кабун-1» постоянно и равно 29 МВА (таблица 4.17).

#### 4.6. Алгоритм оценки влияния вида графиков нагрузки на продолжительность срока эксплуатации трансформаторов подстанции «Кабун-1» – вариант 3

Аналогично п.4.3 – для разработки алгоритма оценки срока службы трансформаторов при учете условий, обозначенных в главе 3, требуется определить вид графиков коэффициентов загрузки трансформаторов ( $K_{зг.вар.3}$  и  $S_{сумм.Каб.вар.3}$ ) и температуры нагрева обмоток ( $t_{обм.вар.3}$ ). Далее определяются значения относительного срока службы трансформаторов ( $T_{с.сл.вар.3}$ ).

Коэффициент загрузки трансформаторов 33/11 кВ ПС «Кабун-1» – вар3 вычисляется

$$\begin{aligned}
 K_{зг.вар.3} &= \frac{S_{сумм.Каб.вар.3}}{S_{ном}} ; \\
 t = 1 \text{ ч} &\Rightarrow K_{зг} = \frac{24,5}{40} = 0,61 ; \\
 t = 2 \text{ ч} &\Rightarrow K_{зг} = \frac{24,5}{40} = 0,61 . \\
 &\vdots
 \end{aligned}
 \tag{4.7}$$

С помощью (2.61), относительный срок службы трансформаторов 33/11 кВ ПС «Кабун-1» – вар.3 вычисляется

$$\begin{aligned}
 T_{с.сл.вар.3}^* &= -1,46K_{зг.вар.3}^2 - 0,5K_{зг.вар.3} + 1,83; \\
 t = 1 \text{ ч} &\Rightarrow T_{с.сл}^* = -1,46(0,61)^2 - 0,5(0,61) + 1,83 = 1,42; \\
 t = 2 \text{ ч} &\Rightarrow T_{с.сл}^* = -1,46(0,61)^2 - 0,5(0,61) + 1,8 = 1,42. \\
 &\vdots
 \end{aligned}
 \tag{4.8}$$

Результаты расчетов представлены в таблице 4.18.

Таблица 4.18 – Расчетные значения коэффициентов загрузки и соответствующего относительного срока службы трансформаторов ПС «Кабун-1» – вариант 3

| Время, ч | $S_{\text{сумм.Каб.вар.3}} (S_{\text{ном}} = 40 \text{ МВА})$ | $K_{\text{зг.вар.3}}$ | $T_{\text{с.сл.вар.3}}^*$ |
|----------|---|-----------------------|---------------------------|
| 1        | 24,5  | 0,61                  | 1,42                      |
| 2        | 24,5  | 0,61                  | 1,42                      |
| 3        | 25,1  | 0,63                  | 1,39                      |
| 4        | 25  | 0,63                  | 1,38                      |
| 5        | 27,5  | 0,69                  | 1,21                      |
| 6        | 34,7  | 0,87                  | 0,78                      |
| 7        | 35  | 0,88                  | 0,62                      |
| 8        | 34,7  | 0,87                  | 0,62                      |
| 9        | 36,21   | 0,91                  | 0,48                      |
| 10       | 32,5  | 0,81                  | 0,7                       |
| 11       | 27  | 0,68                  | 1,15                      |
| 12       | 24,2  | 0,61                  | 1,32                      |
| 13       | 24,2  | 0,61                  | 1,33                      |
| 14       | 24,9  | 0,62                  | 1,25                      |
| 15       | 25  | 0,63                  | 1,22                      |
| 16       | 24,9  | 0,62                  | 1,25                      |
| 17       | 25  | 0,62                  | 1,2                       |
| 18       | 24,8  | 0,62                  | 0,97                      |
| 19       | 34,2  | 0,85                  | 0,7                       |
| 20       | 35,5  | 0,89                  | 0,5                       |
| 21       | 35,5  | 0,89                  | 0,52                      |
| 22       | 35,7  | 0,89                  | 0,5                       |
| 23       | 25,5  | 0,64                  | 1,3                       |
| 24       | 24  | 0,60                  | 1,45                      |
| Сред     | 28,75   | 0,72                  | 1,05                      |
| Макс     | 36,21   | 0,90                  | 1,45                      |

На рисунке 4.15 и 4.16 представлены графические зависимости суточного изменения коэффициента загрузки и относительного срока службы исследуемых трансформаторов для вар. 3.

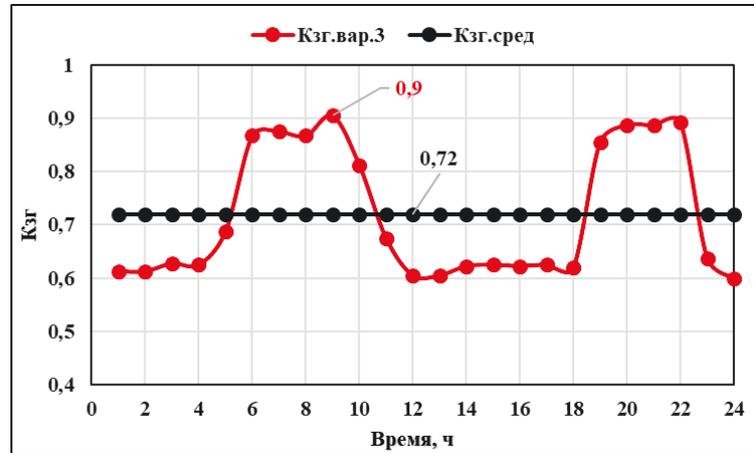


Рисунок 4.15 – Графические зависимости суточного изменения коэффициента загрузки трансформаторов ПС «Кабун-1» – вариант 3

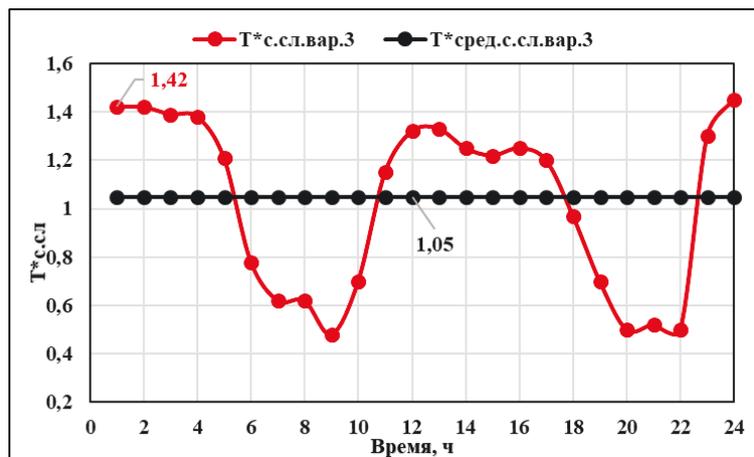


Рисунок 4.16 – Графические зависимости относительного срока службы трансформаторов ПС «Кабун-1» – вариант 3

С помощью (2.60) определим значения температуры нагревания обмоток исследуемых трансформаторов (вар. 3).

$$t_{\text{обм.вар.3}} = \frac{11,79 - T_{\text{с.сл.вар.3}}^*}{0,125};$$

$$t = 1 \text{ ч} \Rightarrow t_{\text{обм}} = \frac{11,79 - 1,42}{0,125} = 81,66 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$t = 2 \text{ ч} \Rightarrow t_{\text{обм}} = \frac{11,79 - 1,42}{0,125} = 81,66 \text{ }^\circ\text{C}.$$

$$\vdots$$
(4.9)

Результаты расчетов представлены в таблице 4.19.

Таблица 4.19 – Расчетные значения температуры нагревания обмоток трансформаторов ПС «Кабун-1» – вариант 3

| Время, ч | $t_{обм.исх}, ^\circ\text{C}$ | $T^*_{с.сл.вар.3}$ | $t_{обм.вар.3}, ^\circ\text{C}$ |
|----------|-------------------------------|--------------------|---------------------------------|
| 1        | 83,5                          | 1,42               | 81,66                           |
| 2        | 83,5                          | 1,42               | 81,66                           |
| 3        | 83,5                          | 1,39               | 81,9                            |
| 4        | 83,5                          | 1,38               | 81,98                           |
| 5        | 83,5                          | 1,21               | 83,34                           |
| 6        | 88                            | 0,78               | 86,78                           |
| 7        | 93,5                          | 0,62               | 88,06                           |
| 8        | 95                            | 0,62               | 88,06                           |
| 9        | 97,5                          | 0,48               | 89,18                           |
| 10       | 96,5                          | 0,7                | 87,42                           |
| 11       | 93,5                          | 1,15               | 83,82                           |
| 12       | 93,5                          | 1,32               | 82,46                           |
| 13       | 93,5                          | 1,33               | 82,38                           |
| 14       | 93,5                          | 1,25               | 83,02                           |
| 15       | 93,5                          | 1,22               | 83,26                           |
| 16       | 92                            | 1,25               | 83,02                           |
| 17       | 92                            | 1,2                | 83,42                           |
| 18       | 92                            | 0,97               | 85,26                           |
| 19       | 92                            | 0,7                | 87,42                           |
| 20       | 92                            | 0,5                | 89,02                           |
| 21       | 92                            | 0,52               | 88,86                           |
| 22       | 92                            | 0,5                | 89,02                           |
| 23       | 84                            | 1,3                | 82,62                           |
| 24       | 84                            | 1,45               | 81,42                           |
| Сред     | 90,3                          | 1,05               | 84,8                            |
| Макс     | 97,5                          | 1,45               | 89,18                           |

На рисунке 4.17 показаны графические зависимости суточных значений температуры нагрева обмоток исследуемых трансформаторов по данным таблицы 4.19 для различных вариантов нагрузки.

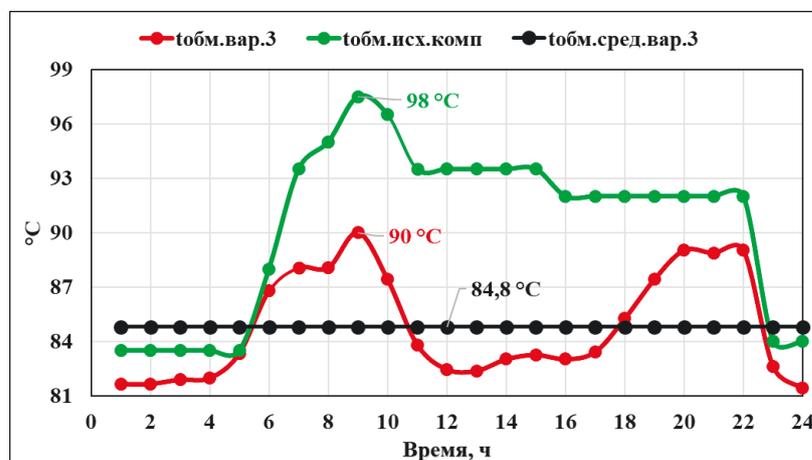


Рисунок 4.17 – Графические зависимости суточных значений температуры нагрева обмотки трансформаторов ПС «Кабун-1» – исходный и вариант 3

Для различных вариантов графиков нагрузок, значения температуры нагрева обмоток и срока службы трансформаторов ПС «Кабун-1» показаны в таблице 4.20.

Таблица 4.20 – Значения температуры нагрева обмотки и срока службы трансформаторов ПС «Кабун-1» для различных вариантов графиков нагрузок

| Основные режимы электропотребления нагрузками | $K_{зг.сред}$ | $K_{зг.макс}$ | $t_{обм.сред}$ | $t_{обм.макс}$ | $T^*_{с.сл}$ |
|---|---------------|---------------|----------------|----------------|--------------|
| Полной мощности нагрузки                      | 0,8           | 1,18          | 92 °C          | 103 °C         | 0,5          |
| С учетом КУ                                   | 0,75          | 1,05          | 90 °C          | 98 °C          | 0,63         |
| Вар.2   | 0,75          | 0,94          | 87 °C          | 92 °C          | 0,9          |
| Вар.3   | 0,72          | 0,9           | 84,8 °C        | 90 °C          | 1,05         |

Таблица 4.20 показывает, что:

1. Значение среднего коэффициента загрузки трансформаторов вар.3 электропотребителей ПС «Кабун-1») равно 0,72, предельные значения: 0,61 – 0,91.

2. Значение среднего относительного срока службы трансформаторов при вар.3 и, в соответствии с главой 3, равно 1,05 (больше желаемого). Это объясняется тем, что значение средней температуры нагрева обмотки 84,8 °С (таблица 4.20) меньше допустимого 85°С.

3. Значение срока службы трансформаторов в случае соответствия графика нагрузки вар. 3, существенно больше, (примерно на 67 %) – 0,63→1,05, чем при исходном графике с установкой компенсирующих устройств.

#### **4.7. Технико-экономическое обоснование внедрения разработанных мероприятий для повышения эффективности эксплуатации и увеличения срока службы трансформаторов 33/11 кВ подстанции «Кабун-1»**

В рамках настоящего исследования при внедрении разработанных мероприятий предполагается увеличение длительности срока эксплуатации трансформаторов (с КУ – с 17 до 22 лет, вар. 2 – с 17 до 31,5 лет и вар. 3 – с 17 до 36,75 лет). Данный аспект свидетельствует о наличии отложенного спроса на приобретение электрооборудования.

Следует отметить, что под отложенным спросом понимается часть общего потребительского спроса, который представляет собой потребность, удовлетворение которой сдвинуто на будущий период или пролонгирован срок его использования в силу определённых факторов для потребителя. Для примера произведем технико-экономическое обоснование (ТЭО) и расчет стоимости сэкономленных средств при эксплуатации двух трансформаторов 33/11 кВ,  $S_{ном} = 20$  МВА с учетом установки 12 батарей конденсаторов в СЭС. Рассчитаем стоимость амортизационных отчислений

$$A_M = \frac{C}{СПИ} ; \quad (4.10)$$

$$СПИ = T_{ном} \times T_{с.сл.}^*$$

где  $A_M$  (\$/год) – стоимость амортизационных отчислений;  $C$  (\$) – первоначальная или восстановительная стоимость трансформатора;  $СПИ$  (лет) – срок полезного

использования трансформатора;  $T_{ном}$  (лет) – нормированный срок службы трансформатора;  $T_{с.сл}^*$  – относительный срок службы трансформаторов.

Стоимость трансформатора 33/11 кВ типа УТЕС,  $S_{ном}=20$  МВА, составляет 155000 \$ [100]. При этом в СЭС установлены 12 батарей конденсаторов (таблица 3.6) на стороне низшего напряжения ТР7, ТР13, ТР22, ТР23, ТР25; ТР26; ТР27; ТР30; ТР31; ТР32; ТР33; ТР34, стоимость которых (фирмы Schneider Electric) представлена в таблице 4.21 [101].

Таблица 4.21 – Стоимость батарей конденсаторов производства фирмы Schneider Electric мощностью от 400 до 700 кВАр, 400 В, 50 Гц

| ТР   | $Q_{БК}$ (кВАр) | Цена (\$) |
|------|-----------------|-----------|
| 7    | 400             | 1000      |
| 13   | 400             | 1000      |
| 22   | 400             | 1000      |
| 33   | 400             | 1000      |
| 23   | 500             | 1300      |
| 34   | 500             | 1300      |
| 26   | 600             | 1500      |
| 27   | 600             | 1500      |
| 30   | 600             | 1500      |
| 32   | 600             | 1500      |
| 25   | 700             | 1800      |
| 31   | 700             | 1800      |
| Сумм | 6400            | 16200     |

Суммарная стоимость двух трансформаторов ( $C_1=310000$  \$) и 12 батарей конденсаторов ( $C_2=16200$  \$):

$$C = C_1 + C_2;$$

$$C = (2 \times 155000) + (4 \times 1000 + 2 \times 1300 + 4 \times 1500 + 2 \times 1800); \quad (4.11)$$

$$C = 310000 + 16200 = 326200 \$.$$

Результаты расчета срока полезного использования трансформатора показаны в таблице 4.22.

Таблица 4.22 – Результаты расчета срока службы трансформаторов 33/11 кВ

| Основные характеристики нагрузок электропотребителей | $T_{ном}$ (лет) | $T_{с.сл}^*$ | $СПИ$ (лет) = $T_{ном} \cdot T_{с.сл}^*$ |
|--|-----------------|--------------|--|
| 1. Без учета КУ                                      | 35              | 0,5          | 17                                       |
| 2. С учетом КУ                                       | 35              | 0,63         | 22                                       |
| 3. Вар.2   | 35              | 0,9          | 31,5                                     |
| 4. Вар.3   | 35              | 1,05         | 36,75                                    |

Стоимость амортизационных отчислений составит

1. Без учета КУ:

$$T_{с.сл}^* = 0,5 \Rightarrow A_{м.1} = \frac{C}{СПИ_1} = \frac{C}{T_{ном} \times T_{с.сл}^*} = \frac{326200}{35 \times 0,5} = 19188 \text{ \$/год.} \quad (4.12)$$

2. С учетом КУ (увеличение срока службы с 17 до 22 лет):

$$T_{с.сл}^* = 0,63 \Rightarrow A_{м.2} = \frac{C}{СПИ_2} = \frac{326200}{35 \times 0,63} = 14827 \text{ \$/год.} \quad (4.13)$$

3. Вариант 2 (увеличение срока службы с 17 до 31,5 лет):

$$T_{с.сл}^* = 0,9 \Rightarrow A_{м.3} = \frac{C}{СПИ_3} = \frac{326200}{35 \times 0,9} = 10355 \text{ \$/год.} \quad (4.14)$$

4. Вариант 3 (увеличение срока службы с 17 до 36,75 лет):

$$T_{с.сл}^* = 1,05 \Rightarrow A_{м.4} = \frac{C}{СПИ_4} = \frac{326200}{35 \times 1,05} = 8876 \text{ \$/год.} \quad (4.15)$$

Экономия в год (без КУ; с КУ):

$$\mathcal{E}_{17 \rightarrow 22} = A_{м.1} - A_{м.2} = 19188 - 14827 = 4361 \text{ \$/год.} \quad (4.16)$$

Экономия в год (без КУ; вар.2):

$$\mathcal{E}_{17 \rightarrow 31,5} = A_{м.1} - A_{м.3} = 19188 - 10355 = 8833 \text{ \$/год.} \quad (4.17)$$

Экономия в год (без КУ; вар.3):

$$\mathcal{E}_{17 \rightarrow 36,75} = A_{м.1} - A_{м.4} = 19188 - 8876 = 10312 \text{ \$/год.} \quad (4.18)$$

За период с 2024 до 2030 г.г. прогнозируемое значение среднего индекса инфляции доллара ( $I_{инф}$ ) составляет 3,18 % в год.

Сумма инфляции к получаемой экономии в год

$$B = \mathcal{E} \times I_{\text{инф}} \% \quad (4.19)$$

Экономия в год с учетом инфляции

$$D = \mathcal{E} + B. \quad (4.20)$$

Результаты расчета экономии за счет увеличения срока службы для различных вариантов представлены в таблице 4.23.

Таблица 4.23 – Экономия за счет увеличения срока службы двух трансформаторов (с КУ; вариант 2; вариант 3) за 5 лет

| Год                         | $I_{\text{инф}} \%$ | С КУ                                      |                                 |                                 | Вариант 2                                   |                                   |                                   | Вариант 3                                    |                                    |                                    |
|-----------------------------|---------------------|---|---------------------------------|---------------------------------|---|-----------------------------------|-----------------------------------|--|------------------------------------|------------------------------------|
|                             |                     | $\mathcal{E}_{17 \rightarrow 22}$<br>(\$) | $B_{17 \rightarrow 22}$<br>(\$) | $D_{17 \rightarrow 22}$<br>(\$) | $\mathcal{E}_{17 \rightarrow 31,5}$<br>(\$) | $B_{17 \rightarrow 31,5}$<br>(\$) | $D_{17 \rightarrow 31,5}$<br>(\$) | $\mathcal{E}_{17 \rightarrow 36,75}$<br>(\$) | $B_{17 \rightarrow 36,75}$<br>(\$) | $D_{17 \rightarrow 36,75}$<br>(\$) |
| 2024 г.                     | 3,18                | 4361                                      | 139                             | 4500                            | 8833  | 281                               | 9114                              | 10312  | 328                                | 10640                              |
| 2025 г.                     | 3,18                | 4361                                      | 139                             | 4500                            | 8833  | 281                               | 9114                              | 10312  | 328                                | 10640                              |
| 2026 г.                     | 3,18                | 4361                                      | 139                             | 4500                            | 8833  | 281                               | 9114                              | 10312  | 328                                | 10640                              |
| 2027 г.                     | 3,18                | 4361                                      | 139                             | 4500                            | 8833  | 281                               | 9114                              | 10312  | 328                                | 10640                              |
| 2028 г.                     | 3,18                | 4361                                      | 139                             | 4500                            | 8833  | 281                               | 9114                              | 10312  | 328                                | 10640                              |
| Суммарная экономия за 5 лет |                     |   |                                 | 22500                           |   |                                   | 45570                             |  |                                    | 53200                              |

Т.о., по результатам проведенных исследований установлено, что за 5 лет эксплуатации двух трансформаторов 33/11 кВ,  $S_{\text{ном}} = 20$  МВА:

1. с учетом установки 12 батарей конденсаторов в СЭС и увеличении срока службы с 17 до 22 лет, экономия финансовых средств составляет  $D = 22500$  \$, что соответствует 15 % от первоначальной стоимости трансформатора (155000 \$) в настоящее время;

2. при вар. 2 и увеличении срока службы с 17 до 31,5 лет экономия финансовых средств составляет  $D = 45570$  \$, что соответствует 29 % от первоначальной стоимости трансформатора (155000 \$) в настоящее время;

3. при вар. 3 и увеличении срока службы с 17 до 36,75 лет экономия финансовых средств составляет  $D = 53200$  \$, что соответствует 34 % от первоначальной стоимости трансформатора (155000 \$) в настоящее время.

#### 4.8. Выводы по главе

1. Представлены способы выравнивания графиков нагрузок Прядельно-ткацкой фабрики: сдвиг времени начала работы ткацкого производства с 5:30 ч на 12:30 ч (вариант 1); сдвиг времени начала работы ткацкого производства с 5:30 ч на 12:30 ч и прядильного производства с 5:30 ч на 22:30 ч (вариант 2).

2. Доказано, что для варианта 3 сдвига времени начала работы наибольшая мощность нагрузки снижается на 5,38 МВА (42 – 36,25), вариация нагрузок снижается с 0,33 до 0,17 по отношению к варианту 2 только для подразделений Прядельно-ткацкой фабрики, наибольшее значение снизилось ещё на 0,85 МВА. При этом во всех вариантах среднее значение мощности нагрузок трансформаторов напряжением 33/11 кВ ПС «Кабун-1» постоянно и составляет 28,9 МВА.

3. Установлено, что срок службы трансформаторов ПС «Кабун-1» зависит от времени начала работы подразделений Прядельно-ткацкой фабрики. В этом случае в варианте 2 срок службы трансформаторов при выравнивании графика нагрузок существенно больше (примерно 43 %) –  $0,63 \rightarrow 0,9$ , чем для исходного графика нагрузок с учётом компенсации реактивной мощности и средняя температура нагрева обмотки уменьшилась на 3 °С (90 → 87) °С. Для варианта 3 срок службы трансформаторов существенно выше (67 %) –  $0,63 \rightarrow 1,05$ , чем при исходном графике с установкой компенсирующих устройств и средняя температура нагрева обмотки при этом уменьшается на 5,2 °С (90 → 84,8) °С.

4. Установлено, что за 5 лет эксплуатации двух трансформаторов 33/11 кВ,  $S_{ном} = 20$  МВА: с учетом установки 12 батарей конденсаторов в СЭС и увеличении срока службы с 17 до 22 лет, экономия финансовых средств составляет 22500 \$, что соответствует 15 % от первоначальной стоимости трансформатора (155000 \$); при вар. 2 и увеличении срока службы с 17 до 31,5 лет экономия финансовых средств

составляет 45570 \$, что соответствует 29 % от первоначальной стоимости трансформатора (155000 \$); при вар.3 и увеличении срока службы с 17 до 36,75 лет экономия финансовых средств составляет 53200 \$, что соответствует 34 % от первоначальной стоимости трансформатора (155000 \$) в настоящее время.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение проблемы повышения эффективности эксплуатации силового электрооборудования в условиях экстремально высоких температур окружающей среды Сирийской Арабской Республики с помощью научно обоснованных мероприятий по регулированию потребления ЭЭ и выравниванию графиков нагрузок трансформаторов, имеющее важное теоретическое и практическое значение и являющееся значительным вкладом в развитие энергетической сферы САР.

Основные научные и практические результаты, обобщенные в диссертации, заключаются в следующем:

1. В результате проведенного анализа эксплуатации СЭС и потребления ЭЭ нагрузками промышленной зоны г. Адра (САР) установлено, что наиболее значимыми для увеличения срока службы силовых трансформаторов ПС «Кабун-1» при использовании выравнивания графиков суммарных нагрузок, являются мероприятия с Прядильно-ткацкой фабрикой, имеющей наибольшую потребляемую мощность.

2. Впервые разработана методика оценки температуры перегрева элементов трансформатора в конце интервала времени постоянной нагрузки, отличающаяся от известных возможностью обеспечения максимальной энергоэффективности эксплуатации при учете параметров работы трансформаторов (загрузки трансформатора и климатических условий).

3. Впервые разработан алгоритм оценки относительного срока службы силовых трансформаторов, отличающийся от известных учетом параметров режимов потребления ЭЭ нагрузками.

4. Показано, что при установке компенсирующих устройств в СЭС Прядильно-ткацкой фабрики, коэффициент загрузки трансформаторов ПС «Кабун-1» уменьшается с 0,80 до 0,75, а температура нагрева обмоток

трансформаторов снижается с 92°C до 90°C, следовательно, величина относительного срока службы трансформаторов увеличивается с 0,5 до 0,63.

5. Разработана имитационная модель в программной среде MATLAB электрической схемы трансформаторов 33/11 кВ ПС «Кабун-1» и нагрузки. При этом показано совпадение результатов моделирования со значением разработанной функции аппроксимации температуры среднего нагрева обмотки трансформатора с погрешностью, не превышающей 1%.

6. Установлено, что при регулировании потребления ЭЭ, исходные суточные графики мощности нагрузок трансформаторов Прядильно-ткацкой фабрики в первом приближении достоверно аппроксимируются функцией косинуса с периодом  $T^{[1]}=24$  ч, но для совпадения минимального и максимального значения мощности во втором приближении, целесообразно использовать сумму двух гармонических функций косинуса с периодом  $T_1^{[2]}=24$  ч, и  $T_2^{[2]}\approx 6$  ч.

7. Разработаны мероприятия по регулированию потребления ЭЭ от трансформаторов 33/11 кВ ПС «Кабун-1», повышающие эффективность эксплуатации электрооборудования и позволяющие увеличить срок службы трансформаторов с учетом климатических условий САР.

8. В результате технико-экономического обоснования установлено, что за 5 лет эксплуатации двух трансформаторов 33/11 кВ,  $S_{ном} = 20$  МВА: с учетом установки 12 батарей конденсаторов в СЭС и увеличении срока службы с 17 до 22 лет, экономия финансовых средств составляет  $D=22500$  \$, что соответствует 15% от первоначальной стоимости трансформатора (155000 \$); при вар. 2 и увеличении срока службы с 17 до 31,5 лет экономия финансовых средств составляет  $D = 45570$  \$, что соответствует 29 % от первоначальной стоимости трансформатора (155000 \$); при вар.3 и увеличении срока службы с 17 до 36,75 лет экономия финансовых средств составляет  $D = 53200$  \$, что соответствует 34% от первоначальной стоимости трансформатора (155000 \$) в настоящее время.

Рекомендации и перспективы дальнейшего развития результатов диссертационной работы:

- совершенствование способов регулирования потребления ЭЭ в условиях арктического климата, направленных на увеличение срока службы силовых трансформаторов и повышение эффективности электроснабжения потребителей, а также разработка технических решений для повышения надежности эксплуатации электрооборудования;

- разработанные модели аппроксимирующих функций оценки температурных режимов – температуры нагревания масла и обмоток трансформаторов – рекомендованы для практического применения при исследовании режимных параметров трансформаторов с номинальной мощностью 20 мВА;

- разработанный алгоритм оценки влияния вида графиков нагрузки на продолжительность эксплуатации трансформаторов рекомендован для практического применения не только в Сирийской Арабской Республике, но и в странах с похожими климатическими условиями (Ирак, Иордания, Саудовская Аравия и т. д.).

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

**Список использованных сокращений**

ЭЭ – электроэнергия.

САР – Сирийская Арабская Республика.

ПР – Потребитель-регулятор.

ГН – графики нагрузки.

ДСП – древесно-стружечные предприятия.

ГОК – горно-обогатительный комбинат.

феррост. печи – ферросталеплавильные печи.

ЛСС – стоимость жизненного цикла.

DGA – анализ растворенных газов.

ТР – трансформатор.

ПС – подстанция.

Ком-быт. – коммунально-бытовые.

Мех. мастерская – механическая мастерская.

Пряд-ткац. – Прядильно-ткацкая.

АЗС – автозаправочная станция.

КУ – компенсирующие устройства.

DMK – цифровой мультиметр.

СЭС – система электроснабжения.

MATLAB – (англ. Matrix Laboratory) пакет прикладных программ.

Исх. – исходный.

Апп. – аппроксимированный.

МНК – метод наименьших квадратов.

Вар. – вариант.

ТЭО – технико-экономическое обоснование.

### Список использованных обозначений

- $\tau$  – время максимума;
- $\sigma_s$  – среднеквадратическое отклонение полной мощности нагрузки;
- $\gamma_s$  – вариация полной мощности нагрузки;
- $K_{зп}$  – коэффициент заполнения графика нагрузки;
- $K_{зг}$  – коэффициент загрузки;
- $K_{одн}$  – коэффициент одновременности максимумов нагрузки;
- $I_{эф}$  – отношение эффективной токовой нагрузки;
- $I_{ном.т}$  – номинальный ток трансформатора;
- $R^2$  – коэффициент детерминации;
- $R_{кор}$  – коэффициент корреляции;
- $T_{с.сл}^*$  – относительный срок службы трансформаторов;
- $t_{обм.сред}$  – температура среднего нагрева обмотки;
- $Q_{БК}$  – номинальная мощность компенсирующих устройств батарей конденсаторов;
- $t_0$  – время наступления начальной фазы;
- $M_p^{[1]}$  – среднее за сутки значение активной мощности нагрузки графика аппроксимации в первом приближении;
- $M_R^{[1]}$  – среднее значение разностей в первом приближении;
- $\delta_R^{[1]}$  – среднеквадратическое отклонение разностей в первом приближении;
- $S_{сумм.апп.фаб.вар.1}$  – суммарный аппроксимированный график полной мощности нагрузок Пряд-ткац. фабрики для первого варианта;
- $S_{апп.ком-быт}$  – аппроксимированный график полной мощности нагрузок трансформаторов коммунально-бытовых потребителей;
- $S_{сумм.апп.Каб.вар.1}$  – суммарный аппроксимированный график полной мощности нагрузок трансформаторов 33/11 кВ ПС «Кабун-1» для первого варианта;
- $S_{ком-быт.вар.3}$  – полная мощность нагрузок коммунально-бытовых

потребителей для третьего варианта;

$S_{\text{сок.вар.3}}$  – полная мощность нагрузок Завода соков для третьего варианта;

$S_{\text{мех.вар.3}}$  – полная мощность нагрузок Механической мастерской для третьего варианта;

$S_{\text{сумм.апп.фаб.вар.3}}$  – суммарная аппроксимированная полная мощность нагрузок Пряд-ткац. фабрики для третьего варианта;

$A_M$  – стоимость амортизационных отчислений;

$C$  – первоначальная или восстановительная стоимость трансформатора;

СПИ – срок полезного использования трансформатора;

$T_{\text{ном}}$  – нормированный срок службы трансформатора;

$I_{\text{инф}}$  – средний индекс инфляции доллара;

$B$  – сумма инфляции к получаемой экономии в год;

$D$  – экономия в год с учетом инфляции;

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брякин, И. В. Система мониторинга технического состояния силового трансформатора по состоянию масла / И. В. Брякин, И. В. Бочкарев // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2022. – Т. 14, № 1(53). – С. 34-46.
2. Чиндин, В. В. Онлайн система мониторинга механического состояния обмоток силового трансформатора / В.В. Чиндин, Л.Б. Москалев // Уральский научный вестник. – 2023. – Т. 1, № 5. – С. 153-155.
3. Полховский, С. В. Применение автоматизированной системы мониторинга для оценки состояния элементов трансформатора / С.В. Полховский, П.С. Пинчуков // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. – 2012. – Т. 2. – С. 111-117.
4. Абдуллазянов, Э. Ю. Прогнозирование и анализ электропотребления и потерь электроэнергии на промышленных объектах / Э.Ю. Абдуллазянов, Е.И. Грачева, А. Альзаккар, М.Ф. Низамиев, О.А.Шумихина, S. Valtchev // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2022. – Т.24. – № 6. – С. 3-12.
5. Xu, Y. Comprehensive Method for Determining Transformer Decommissioning Life Considering Economic Life and Physical Life / Y. Xu, F. Liu, X. Lai, [et al.] // 31st Australasian Universities Power Engineering Conference. – 2021.
6. Chitnavis, K. Review of critical analysis for life estimation of power transformer / Chitnavis K., Bhasme N. R. // 4th International Conference on Power, Control & Embedded Systems. – 2017.
7. Muthanna, K. T. Transformer insulation life assessment / Muthanna K. T., Sarkar A., Das K., Waldner K. // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2006. – Vol. 21. – №. 1. – P. 150-156.
8. Alzakkar, A. An Analytical Study of the Electrical Power Consumption in the Industrial City (Adra – Syria) / Alzakkar A., Gracheva E. and Samofalov Y. //

International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. – 2023. – P. 410-415.

9. Грачева, Е. И. Влияние нагрузочной способности силовых трансформаторов на их эксплуатационные характеристики / Е.И. Грачева, О.В. Наумов, Е.А. Федотов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2017. – Т. 19, № 7-8. – С. 71-77.

10. Анищенко, В. А. Определение допустимых систематических перегрузок распределительных масляных трансформаторов / В.А. Анищенко, В.В. Иванов // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2015. – № 3. – С. 5-15.

11. Chatterjee, A. Mathematical model for predicting the state of health of transformers and service methodology for enhancing their life / Chatterjee A., Roy N. K. // 4th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. – 2011. – P. 126-129.

12. Серебренников, Д. С. Оценка технического состояния силовых трансформаторов с большим сроком службы по результатам внешней тепловизионной диагностики / Д.С. Серебренников, В.Г. Гольдштейн // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2014. – № 3. – С. 100-102.

13. Анищенко, В. А. Оптимизация статистической оценки получасового максимума нагрузки промышленного предприятия / В.А. Анищенко, В.В. Белько // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2009. – № 4. – С. 5-12.

14. Хошимов, Ф. А. Анализ режимов электропотребления промышленных предприятий / Ф. А. Хошимов // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность - 2019: Сборник статей по материалам международной научно-практической конференции, Севастополь, 23–26 сентября 2019 года / Под редакцией Л.И. Лукиной, Н.В. Ляминой. – Севастополь: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Севастопольский государственный университет", 2019. – С. 1716-1719.

15. Скамьин, А. Н. Регулирование режимами электропотребления / А.Н. Скамьин // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. – 2015. – № 4(106). – С. 145-147.
16. Serebrennikov, B. Comprehensive Management of Electricity Demand Distribution in Time Serebrennikov B., Petrova K., Serebrennikov S. // Problems of the Regional Energetics. – 2023. – Vol. 58. – №. 2. – P. 26-40.
17. Куржумбаева, Р. Б. Управление электропотреблением для оптимизации параметров систем электроснабжения / Р.Б. Куржумбаева, М.А. Суеркулов, К.Ж. Бийгазиева, А.И. Саяков // Наука и инновационные технологии. – 2022. – № 4(25). – С. 57-67. – DOI 10.33942/sit042207.
18. Скамьин, А. Н. Влияние напряжения на параметры электропотребления при наличии высших гармоник / А.Н. Скамьин, В.С. Добуш, Ю.В. Растворова // Вопросы электротехнологии. – 2020. – № 1(26). – С. 61-68.
19. Базаров, А. А. Способ выравнивания графика нагрузки мощных индукционных установок / А.А. Базаров, А.И. Данилушкин // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2021. – Т. 29, № 4(72). – С. 71-85.
20. Титаренко, О.Н. Анализ способов выравнивания суточных графиков нагрузки / О.Н. Титаренко // Энергетические установки и технологии. – 2018. – Т. 4, № 3. – С. 67-73.
21. Кочнев, Н. В. Энергоэффективное регулирование напряжения в узлах нагрузки / Н. В. Кочнев // Инновационная наука. – 2022. – № 1-2. – С. 14-16.
22. Альзаккар, А. Моделирование параметров режима электрической сети и системы электроснабжения прядильно-ткацкой фабрики (г. Дамаск, Сирия) / А. Альзаккар // Энергетика и энергосбережение: теория и практика : Сборник материалов VII международной научно-практической конференции, Кемерово, 07–09 декабря 2022 года. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2023. – С. 305-1-305-7.

23. Альзаккар, А. Моделирование структуры внутривозводской электрической сети прядильно-ткацкой фабрики (г. Дамаск, Сирия) / А. Альзаккар, Е.И. Грачева // Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве : Материалы VIII Национальной научно-практической конференции, Казань, 08–09 декабря 2022 года. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2023. – С. 138-142.

24. Якзан, К. Формирование и развитие систем менеджмента качества на промышленных предприятиях (на примере швейной и текстильной отраслей Сирии): специальность 08.00.05 «Экономика и управление народным хозяйством»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кассем Якзан. – Санкт-Петербург, 2004. – С. 202.

25. Воропай, Н. И. Оптимизация суточных графиков нагрузки активных потребителей / Н. И. Воропай, З. А. Стычински, Е. В. Козлова [и др.] // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2014. – № 1. – С. 84-90.

26. Кухарчук, А. В. Потребитель - регулятор и продукция, как аккумулятор электрической энергии на целлюлозно-бумажных комбинатах / А.В. Кухарчук // Оригинальные исследования. – 2019. – Т. 9, № 8. – С. 50-56.

27. Голубев, В. А. Регулирование электрических нагрузок горнодобывающих предприятий с использованием технологических потребителей-регуляторов / В.А. Голубев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2000. – № 11. – С. 210.

28. Ханаев, В. В. Потребители-регуляторы: возможности и перспективы применения / В.В. Ханаев // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2008. – № 1(53). – С. 59-64.

29. Аминов, Р. З. Оценка эффективности потребителя-регулятора в режиме зарядки / Р.З. Аминов, Е.Ю. Бурденкова, Д.М. Пронь // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2011. – Т. 1 – № 3(54). – С. 136-142.

30. Рогозин, И. В. Применение математической модели случайного процесса при идентификации параметров изменения графиков нагрузок / И. В. Рогозин // Молодежь и системная модернизация страны : сборник научных статей 4-й Международной научной конференции студентов и молодых ученых, Курск, 21–22 мая 2019 года. Том 6. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2019. – С. 89-92.

31. Шаев, С. М. Аварийная и технологическая броня электроснабжения / С.М. Шаев, А.А. Шумкин, Е.В. Скребнева // Сборник материалов IX Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых с международным участием "Россия молодая" : Конференция проходит при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Кемерово, 18–21 апреля 2017 года / Ответственный редактор Костюк Светлана Георгиевна. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2017. – С. 21069.

32. Alzakkar, A. Evaluation of the reduction of the fees for the consumption of electricity when the half-hour maximum reduces / A. Alzakkar, E. Gracheva // Energy System. – 2022. – No. 2. – P. 8-12.

33. Белько, В. В. Определение получасового максимума нагрузки промышленного предприятия / В.В. Белько, В.А. Анищенко // Актуальные проблемы энергетики: Материалы 64-й научно-технической конференции студентов, магистрантов и аспирантов. – Мн.: БНТУ, 2009. – С. 184–186.

34. Шпиганович, А. Н. Расчетная оценка получасового максимума мощности промышленного предприятия / А.Н. Шпиганович, Д.М. Жуков // Промышленная энергетика. – 2007. – № 8. – С. 33-35.

35. Гарифуллин, Р. И. Регулирование энергозатрат с помощью двухставочного тарифа / Р.И. Гарифуллин, Д.С. Грабовецкий, Р.М. Фархутдинов // Главный энергетик. – 2014. – № 8. – С. 28-32.

36. Аванесян, В. Р. О формировании двухставочного тарифа / В.Р. Аванесян // Жилищно-коммунальное хозяйство. – 2011. – № 7. – С. 27-29.

37. Морев, В. Г. Оценка эффективности и технических возможностей создания установок регулирования пиков потребления электроэнергии / В.Г. Морев // Энергетик. – 2021. – № 12. – С. 17-22.

38. Альзаккар, А. Экономическая эффективность регулирования потребления электроэнергии / А. Альзаккар, Е. И. Грачева // Энергетика будущего-цифровая трансформация: Сборник трудов III всероссийской научно-практической конференции, Липецк, 14–15 декабря 2022 года. – Липецк: Липецкий государственный технический университет, 2022. – С. 198-202.

39. Тойгамбаев, С. К. Влияние уровня технической эксплуатации машин на суммарные и дополнительные затраты предприятия / С.К. Тойгамбаев // Актуальные проблемы современной науки. – 2016. – № 1(86). – С. 193-198. – EDN VXOXXP.

40. Alzakkar, A. The Impact of Cooling Medium Temperatures on the Nominal Power Selection at Substation Transformers (Kabun-1, Syria) / Alzakkar A., Gracheva E., Mestnikov N. // International Russian Automation Conference. – 2023. – P. 42-47.

41. Li, Y. An approach to aging assessment of power transformer based on multi-parameters / Y. Li, M. Tang, J. Deng, G. Zhang // IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. – 2012. – P. 357-360.

42. Zhengzhihong Study on Insulation Design of High-Power High Frequency High Voltage Transformer / Zhengzhihong, Bailu, Jintao // 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration, 2018.

43. Валид, О. Б. М. Технико-экономическое обоснование применения симметрирующих устройств в условиях промышленных предприятий Сирии: специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Валид Омар Баша Мохамед. – Москва, 1984. – С. 164.

44. Нукари, Р. В. Анализ состояния текстильной отрасли в Сирийской Арабской Республике / Р.В. Нукари, М.М. Бондарчук // Научные исследования. – 2016. – № 5(6). – С. 18-20.

45. Абдуллазянов, Э. Ю. Анализ и исследование электропотребления объектов промышленной зоны г. Адра-Сирия / Э.Ю. Абдуллазянов, Е.И. Грачева, А. Альзаккар // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2023. – Т.25. – № 1. – С. 118-129.

46. Грачева, Е. И. Алгоритмы и вероятностные модели параметров функционирования внутривозовского электроснабжения / Е.И. Грачева, О.В. Наумов, А.Н. Горлов, З.М. Шакурова // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23, № 1. – С. 93-104.

47. Мазуров, Б. Т. Аналитический метод определения коэффициентов корреляции между результатами наблюдений / Б.Т. Мазуров, Ф.Х. Зарзура, С.Х. Ахмед // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2015. – Т. 1, № 1. – С. 179-182. – EDN TVWXAT.

48. Reiersol, O. A note on the signs of gross correlation coefficients and partial correlation coefficients / O. Reiersol // *Biometrika*. – 1956. – Vol. 43, No. 3-4. – P. 480.

49. Шишов, В. В. Эффективность работы холодильного оборудования с учетом годового изменения температур окружающей среды / В.В. Шишов, М.С. Талызин // Холодильная техника. – 2019. – № 6. – С. 28-33.

50. Хужаев, И. К. Исследование одномерного процесса теплообмена с учетом внутреннего тепловыделения, суточного изменения инсоляции и температуры окружающей среды / И.К. Хужаев, Н. Равшанов, Ж.И. Хужаев // Проблемы вычислительной и прикладной математики. – 2016. – № 4(6). – С. 64-74.

51. Dixit, A. Thermal analysis of natural cooling type distribution transformer retrofilled with natural ester oil / Dixit A., Ekanayake C., Hui Ma. // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. – 2022. – Vol. 29. – №. 1. – P. 231-239.

52. Котеленко, С. В. Основные типы систем охлаждения силовых трансформаторов, их сравнительная характеристика, недостатки и преимущества / С.В. Котеленко, А.В. Чижкин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 12. – С. 65-67.

53. Зябкин, А. А. Уточненная тепловая модель трансформатора по стандарту ГОСТ-14209-85 / А.А. Зябкин, О.С. Щукин, А.В. Вейнблат // Культура, наука,

образование: проблемы и перспективы : Материалы III Всероссийской научно-практической конференции, Нижневартовск, 07 февраля 2014 года / Ответственный редактор А.В. Коричко. Том Часть III. – Нижневартовск: Нижневартовский государственный университет, 2014. – С. 56-57.

54. Атоев, М. Х. Особенности практического использования методики ГОСТ 14209-85 для расчета температуры масла в верхних слоях силового трансформатора / М.Х. Атоев, А.В. Бессолицын, А.В. Голговских, Е.Н. Хорошина // Общество, наука, инновации (НПК-2016) : Сборник статей 2-е издание, исправленное и дополненное, Киров, 18–29 апреля 2016 года / Вятский государственный университет. – Киров: Вятский государственный университет, 2016. – С. 2064-2069.

55. Грачева, Е. И. Исследование температурных режимов элементов силовых трансформаторов на примере трансформаторов п|ст «Кабун-1» (Сирийская Арабская Республика) / Е.И. Грачева, А. Альзаккар, С. Валтчев // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2023. – Т.25. – № 2. – С. 84-96.

56. Комков, Е. Ю. Разработка модели управления системой охлаждения силовых трансформаторов / Е.Ю. Комков, А.И. Тихонов // Автоматизация в промышленности. – 2008. – № 8. – С. 45-47.

57. Тимонин, Ю. Н. Система управления охлаждением трансформатора / Ю.Н. Тимонин, В.А. Сушкин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2011. – № 6-1. – С. 257-265.

58. Баширов, М. Г. Повышение эффективности охлаждения силовых масляных трансформаторов / М. Г. Баширов, М. Р. Минлибаев, А. С. Хисматуллин // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. – 2014. – № 2. – С. 347-357.

59. Гильфанов, К. Х. Тепловое CFD-моделирование маслonaполненного силового трансформатора ТМ-160/10 / К.Х. Гильфанов, Т. Нгуен // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2019. – № 10. – С. 7-13.

60. Нагорный, М. А. Количественная оценка теплового использования системы электрической изоляции обмотки трансформатора / М.А. Нагорный // Взрывозащищенное электрооборудование. – 2013. – № 1. – С. 42-49.

61. Макарова, И. Л. Коэффициент детерминации для нелинейной регрессии / И.Л. Макарова, А.М. Игнатенко // Евразийское Научное Объединение. – 2018. – № 3-3(37). – С. 161-163.

62. Chicco, D. The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation / D. Chicco, M. J. Warrens, G. Jurman // PeerJ. Computer Science. – 2021. – Vol. 7. – P. 1-24.

63. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022663274 Российская Федерация. Программа выбора оптимального метода аппроксимации по коэффициенту детерминации: № 2022662977: заявл. 13.07.2022, / В. И. Гончарова; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения».

64. Малова, Н. Н. Об одном подходе к расчету средней ошибки аппроксимации регрессионных моделей / Н.Н. Малова // Международный технико-экономический журнал. – 2017. – № 5. – С. 54-57.

65. Альзаккар, А. Определение функциональной зависимости температуры обмоток и масла трансформаторов от коэффициента загрузки / А. Альзаккар // Тинчуринские чтения - 2023 «Энергетика и цифровая трансформация»: Материалы Международной молодежной научной конференции. В 3-х томах, Казань, 26–28 апреля 2023 года / Под общей редакцией Э.Ю. Абдуллазянова. Том 1. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2023. – С. 165-168.

66. Gracheva, E. I. Reliability and Overload Capacity of Power Transformers / E. I. Gracheva, R. M. Petrova, T. Sinyukova, S. Valtchev, R. Miceli // International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP). – 2023. – P. 684-689.

67. Zanella, R. Numerical Study of Cooling by Ferrofluids in an Electrical Transformer Using an Axisymmetric Model / Zanella R., Nore C., Mininger X., Bouillault F. // IEEE Transactions on Magnetics. – 2021. – Vol. 57. – №. 7.

68. Daghrah, M. Experimental Study of the Influence of Different Liquids on the Transformer Cooling Performance / Daghrah M., Wang Z., Liu Q. // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2019. – Vol. 34. – №. 2. – P. 588-595.

69. Гуляев, М. Ю. Оптимизация затрат на электроснабжение промышленных предприятий / М. Ю. Гуляев // Вестник магистратуры. – 2015. – № 5-1(44). С. 35–39.

70. Герасимов, И. А. Критерии оптимизации механизма энергоснабжения предприятия / И. А. Герасимов // Эффективное антикризисное управление. – 2013. – № 1(76). – С. 98-102.

71. Gracheva, E. Features of Structure of Electric Supply Systems of Industrial Enterprises / E. Gracheva, A. Alimova, A. Gorlov // Proceedings - 2020 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2020: 2, Virtual, Lipetsk, 10 – 13 ноября 2020 года. Vol. 2nd International Conference. – Virtual, Lipetsk, 2020. – P. 910-913.

72. Oil distribution transformers ELSEWEDY ELECTRIC. URL: <https://www.elsewedyelectric.com/en/business-lines/electrical-roducts/transformers/oil-distribution-transformers>. [Accessed: 26-December-2021].

73. ДМК – Цифровые мультиметры на 47 и 251 параметр измерения светодиодная индикация. URL: <https://amitron-ek.ru/catalog/4023/77880.html/> (дата обращения: 18.01.2023).

74. Панкратов, А. В. Методика идентификации статических характеристик нагрузки по результатам активного эксперимента / А.В. Панкратов, Ю.В. Хрущев, Н.Л. Бацева и др. // Изв. Томск. политехн. унта. – 2014. – № 4 (325). – С. 164–175.

75. Панкратов, А. В. Экспериментальное определение статических характеристик нагрузки электроэнергетических систем / А.В. Панкратов, В.И. Полищук, Н.Л. Бацева // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2015. – Т. 15, № 1. – С. 11-20.

76. Паздерин, А. В. Определение статической характеристики крупных узлов нагрузки / А.В. Паздерин, А.А. Суворов, А.С. Тавлинцев [и др.] // Научное обозрение. – 2013. – № 7. – С. 70-77.

77. Радкевич, В. Н. Оценка снижения потерь активной мощности в трансформаторах при установке батарей низковольтных конденсаторов / В.Н. Радкевич М.Н. Тарасова // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2014. – № 5. – С. 27-37.

78. Александрова, А. А. Автоматизация работы конденсаторных компенсирующих устройств / А.А. Александрова // НИРС - первая ступень в науку: Сборник научных трудов по материалам XL Международной научно-практической студенческой конференции, Ярославль, 15–16 марта 2017 года. – Ярославль: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Ярославская государственная сельскохозяйственная академия", 2017. – С. 91-97.

79. Islam, F. R. Power quality improvement of distribution network using bess and capacitor bank / F.R. Islam, A. Lallu, K.A. Mamun, K. Prakash, N. K. Roy // Journal of Modern Power Systems and Clean Energy. – 2020. – Vol. 9. – №. 3. – P. 625-632.

80. Bisanovic, S. One approach for reactive power control of capacitor banks in distribution and industrial networks / Bisanovic S., Hajro M., Samardzic M. // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2014. – Vol. 60. – P. 67-73.

81. Kgori, P. Design and Analysis of a Proposed Multistage Capacitor Bank Compensation Scheme / Kgori P., Okojie D. E., Akuru U. B. // IEEE Power Engineering Society Conference and Exposition in Africa, PowerAfrica. – 2022.

82. Alzakkar, A. Harmonics and Their Impact in Determining the Method of Reactive Power Compensation in Electrical Grids / Alzakkar A., Mestnikov N. // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. – 2020.

83. Груненко, В. А. Последствия установки компенсирующих устройств на железнодорожном участке / В.А. Груненко, Н.А. Рыжов // Автоматизация и энергосбережение в машиностроении, энергетике и на транспорте : материалы XVI Международной научно-технической конференции, Вологда, 08 декабря 2021 года. – Вологда: Вологодский государственный университет, 2022. – С. 306-309.

84. Наджиб, С. А. Регулирование электропотребления от трансформаторов подстанции Аль-Рода (Йемен): специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Наджиб Салем Али. – Москва, 2002. – С. 164.

85. Хамитов, Р. Н. Программа аппроксимации графика электропотребления функцией синуса и нахождения коэффициентов функции аппроксимации / Р.Н. Хамитов, А.С. Грицай, Д.А. Тюньков // Хроники объединенного фонда электронных ресурсов Наука и образование. – 2016. – № 9(88). – С. 3.

86. Захаров, В. С. Влияние параметров фидера 35 кВ на аппроксимирующие функции критериев определения места повреждения / В. С. Захаров // Тенденции развития науки и образования. – 2020. – № 58-3. – С. 79-83.

87. Wei, C. Statistically meaningful approximation: a case study on approximating truing machines with transformers / Wei C., Chen Y., Ma T. // Advances in Neural Information Processing Systems. – 2022. – Vol. 35. – P. 12071-12083.

88. Шклярский, Я. Э. Погрешности трансформаторов тока при переменных нагрузках / Я.Э. Шклярский, В.А. Кузнецов // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. – 2012. – № 2. – С. 22-31.

89. Ground / Pad Mounted Transformers UTEC. URL: <https://www.utec.com.sa/categories/3/subcategories/3/products/13/> [Accessed: 06-March-2019].

90. Чуйко, С. М. Модифицированная двухшаговая итерационная техника для построения функций Матье / С.М. Чуйко, О.В. Старкова // Компьютерные исследования и моделирование. – 2012. – Т. 4, № 1. – С. 31-43.

91. Грачева, Е. И. Развитие теории и методов оценки эффективности функционирования низковольтных электрических сетей промышленных предприятий: специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы»: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Грачева Елена Ивановна. – Казань, 2014. – С. 364.

92. Титаренко, О. Н. Анализ способов выравнивания суточных графиков нагрузки / О. Н. Титаренко // Энергетические установки и технологии. – 2018. – Т. 4, № 3. – С. 67-73.

93. Абдуллазянов, Э. Ю. Влияние вида графиков нагрузок на срок эксплуатации трансформаторов напряжением 33/11 кВ п|ст «Кабун-1» (Сирийская Арабская Республика) / Э.Ю. Абдуллазянов, Е.И. Грачева, А. Альзаккар, S. Valtchev // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2023. – Т.25. – № 3. – С. 65-80.

94. Грачева, Е. И. Возможные погрешности расчетов потерь электроэнергии в цеховых промышленных сетях / Грачева Е.И., Алимova А.Н. // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2018. – Т.20. – № 11-12. – С. 81-92.

95. Alzakkar, A. Study of the approximate functions of coil and oil temperature of transformers at substation "Kabun-1" in the Syrian Arab Republic / A. Alzakkar // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 170-летию со дня рождения В.Г. Шухова: Сборник докладов, Белгород, 16–17 мая 2023 года. Vol. Часть 14. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2023. – Р. 16-21.

96. Альзаккар, А. Выбор графика температуры обмоток и масла трансформаторов с использованием функции аппроксимации / А. Альзаккар, Е. И. Грачева // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири : Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Иркутск, 19–23 апреля 2023 года. Том 1. – Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2023. – С. 30-32.

97. Альзаккар, А. Исследование графиков температуры элементов трансформаторов подстанции «Кабун-1» Сирийской арабской республики / А. Альзаккар, Е. И. Грачева, П. М. Николай // Проблемы и перспективы развития электроэнергетики электротехники : Материалы V Всероссийской научно-практической конференции, посвященной празднованию 55-летия КГЭУ. В 2-х томах– Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2023. – С. 201-204.

98. Петрова, Р. М. Исследование вероятностных характеристик надежности электрооборудования внутрицеховых систем электроснабжения / Р. М. Петрова, Э. Ю. Абдуллазянов, Е. И. Грачева [и др.] // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2023. – Т. 15. – № 1(57). – С. 93-105.

99. Корячихина, М. А. Сити-холл как административно-общественный тип пространства / М. А. Корячихина // Студенческий. – 2021. – № 20-1(148). – С. 6-8.

100. PFC Capacitor bank – Schneider Electric. URL: <https://www.se.com/eg/en/product/VLVAF3L300A40B/automatic-easylogic-pfc-capacitor-bank-300kvar/>. [Accessed: 08-May-2021].

101. CPI Inflation Calculator. URL: <https://www.officialdata.org/us/inflation>. [Accessed: 23-February-2024].

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

**Графики активной мощности нагрузки трансформаторов Прядильно-ткацкой фабрики: исходный и функций аппроксимации во втором приближении**

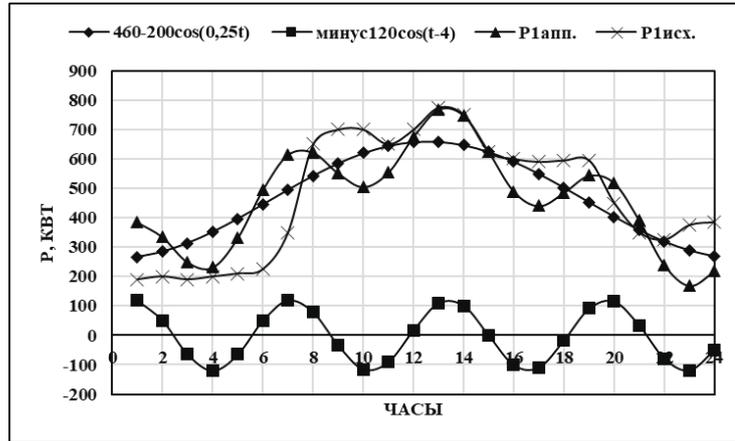


Рисунок А.1 – Графики исходный и функций уточнённой аппроксимации активной нагрузки трансформатора 1

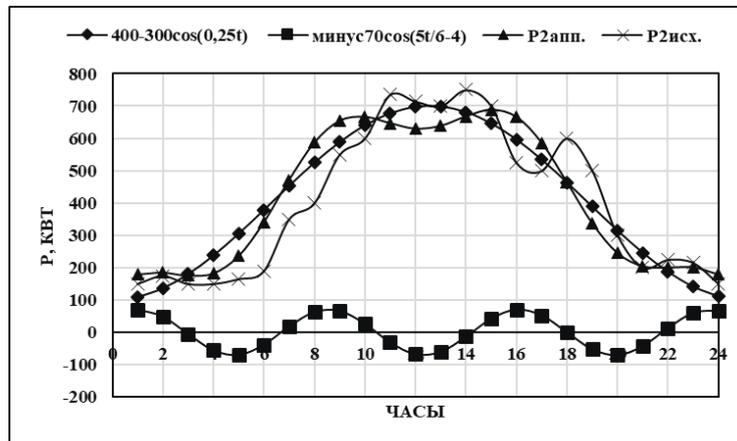


Рисунок А.2 – Графики исходный и функций уточнённой аппроксимации активной нагрузки трансформатора 2

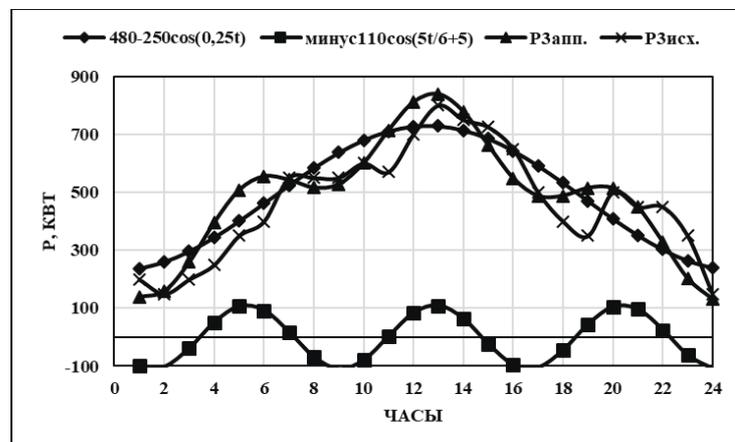


Рисунок А.3 – Графики исходный и функций уточнённой аппроксимации активной нагрузки трансформатора 3

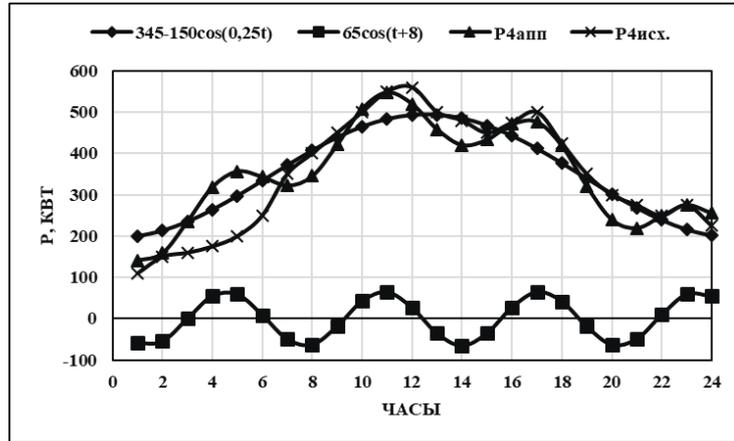


Рисунок А.4 – Графики исходный и функций уточнённой аппроксимации активной нагрузки трансформатора 4

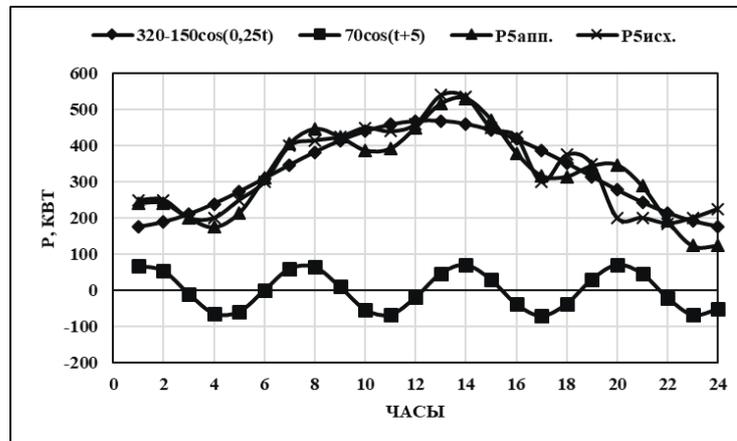


Рисунок А.5 – Графики исходный и функций уточнённой аппроксимации активной нагрузки трансформатора 5

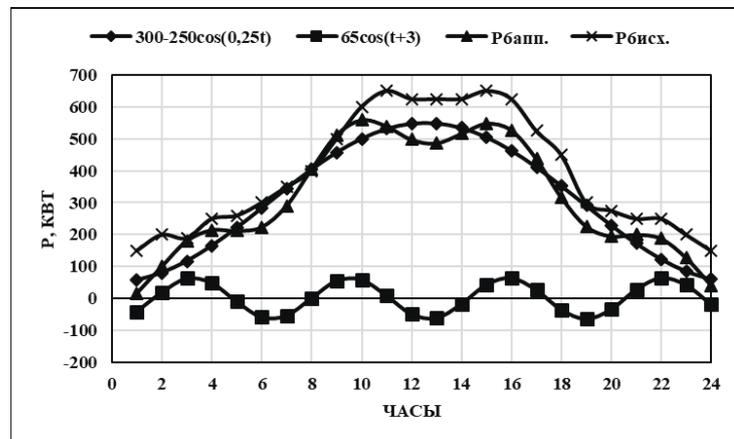


Рисунок А.6 – Графики исходный и функций уточнённой аппроксимации активной нагрузки трансформатора 6

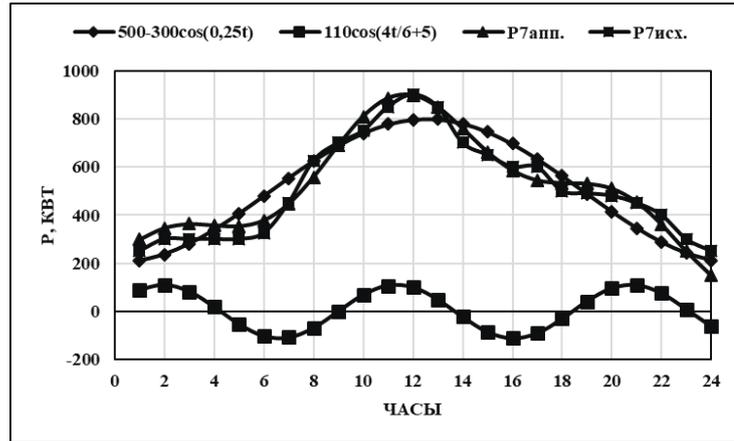


Рисунок А.7 – Графики исходный и функций уточнённой аппроксимации активной нагрузки трансформатора 7

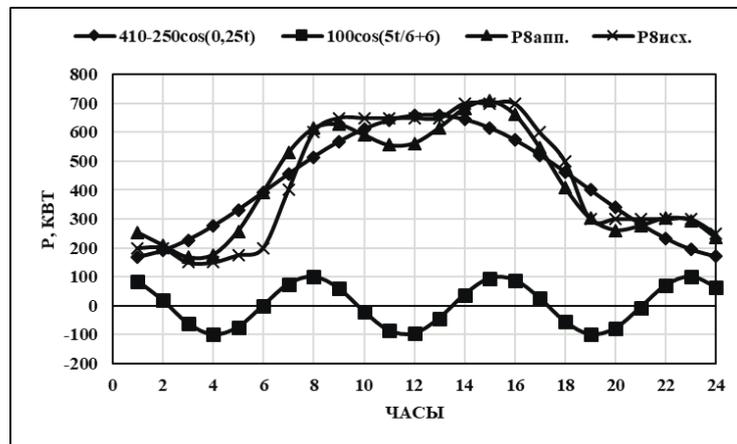


Рисунок А.8 – Графики исходный и функций уточнённой аппроксимации активной нагрузки трансформатора 8

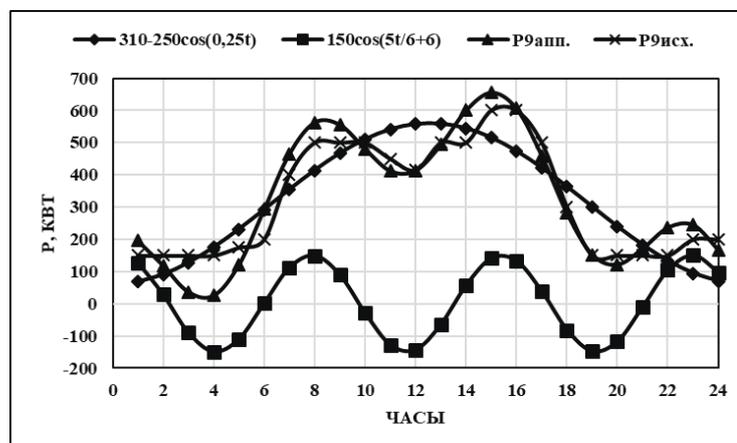


Рисунок А.9 – Графики исходный и функций уточнённой аппроксимации активной нагрузки трансформатора 9

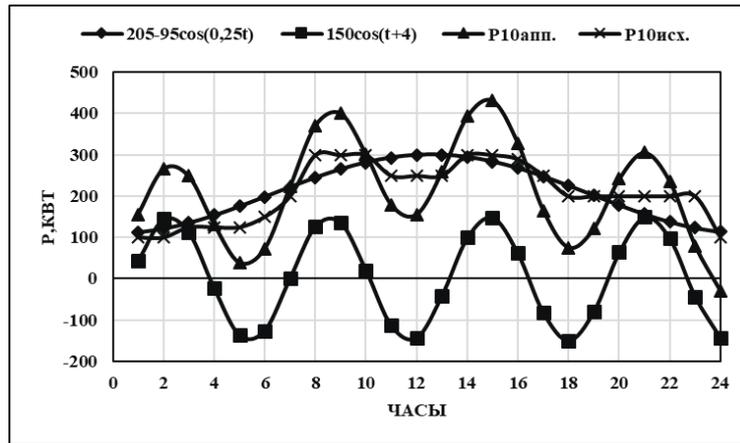


Рисунок А.10 – Графики исходный и функций уточнённой аппроксимации активной нагрузки трансформатора 10

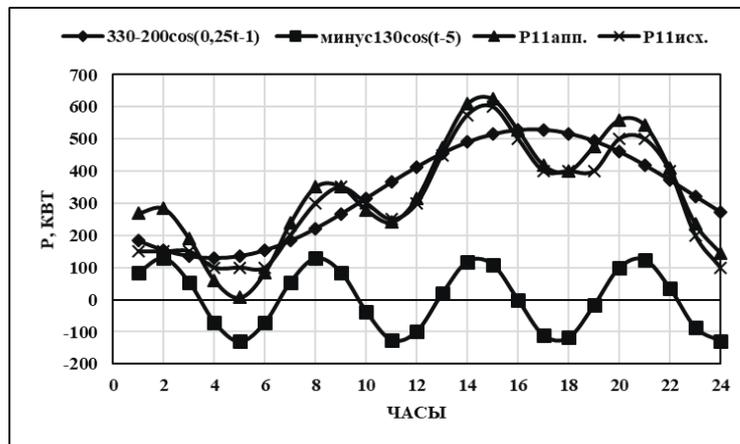


Рисунок А.11 – Графики исходный и функций уточнённой аппроксимации активной нагрузки трансформатора 11

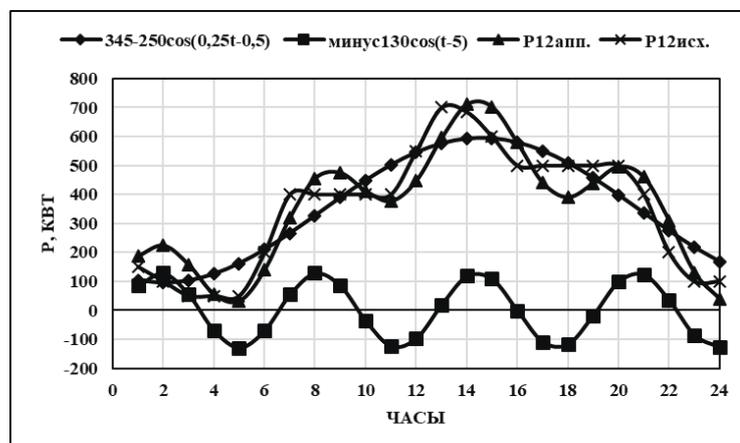


Рисунок А.12 – Графики исходный и функций уточнённой аппроксимации активной нагрузки трансформатора 12

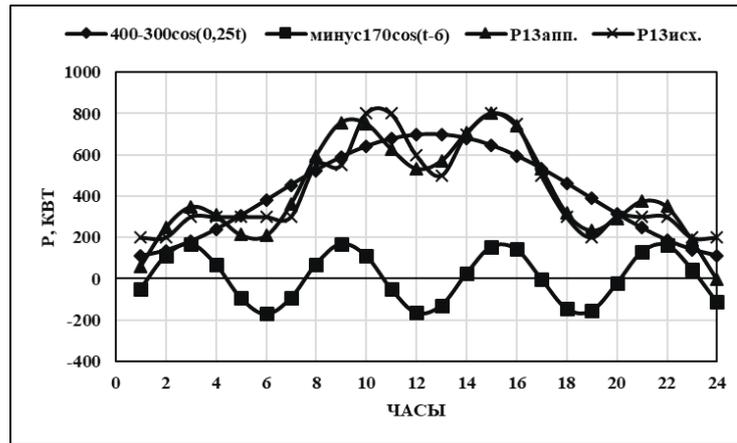


Рисунок А.13 – Графики исходный и функций уточнённой аппроксимации активной нагрузки трансформатора 13

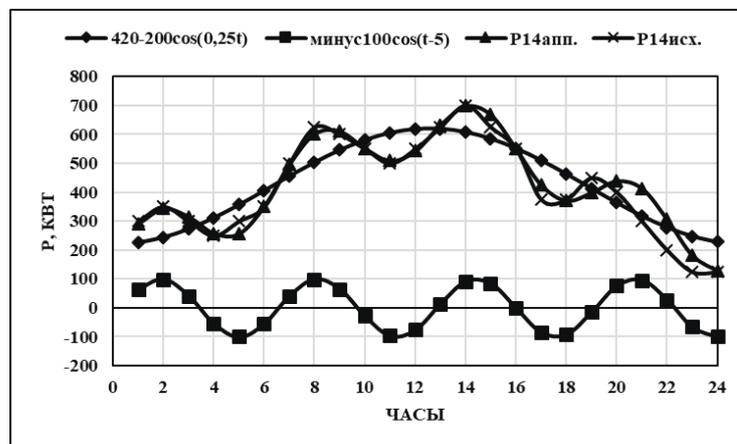


Рисунок А.14 – Графики исходный и функций уточнённой аппроксимации активной нагрузки трансформатора 14

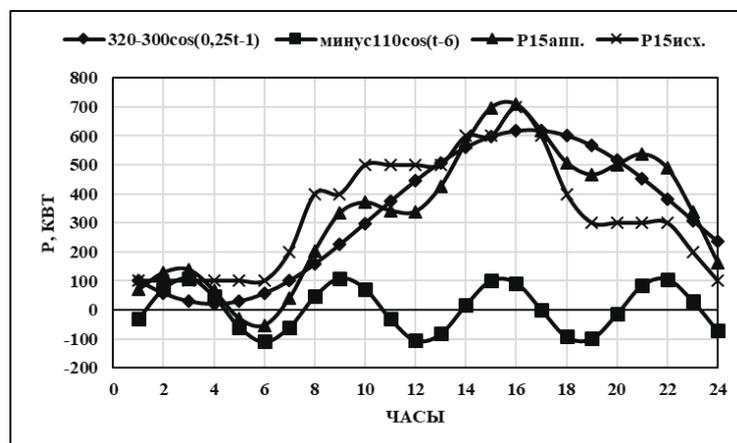


Рисунок А.15 – Графики исходный и функций уточнённой аппроксимации активной нагрузки трансформатора 15

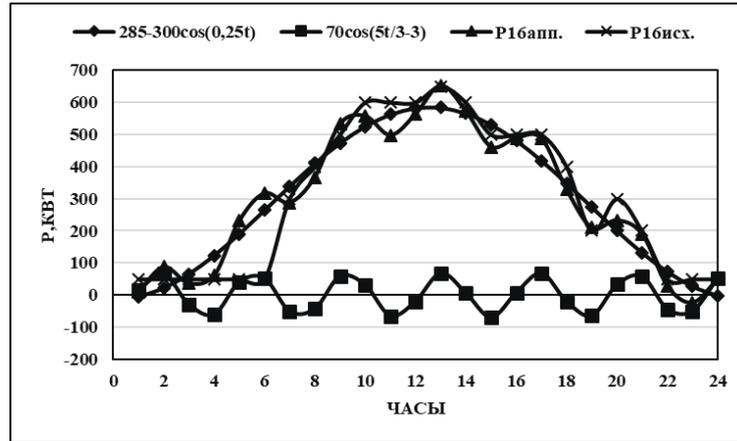


Рисунок А.16 – Графики исходный и функций уточнённой аппроксимации активной нагрузки трансформатора 16

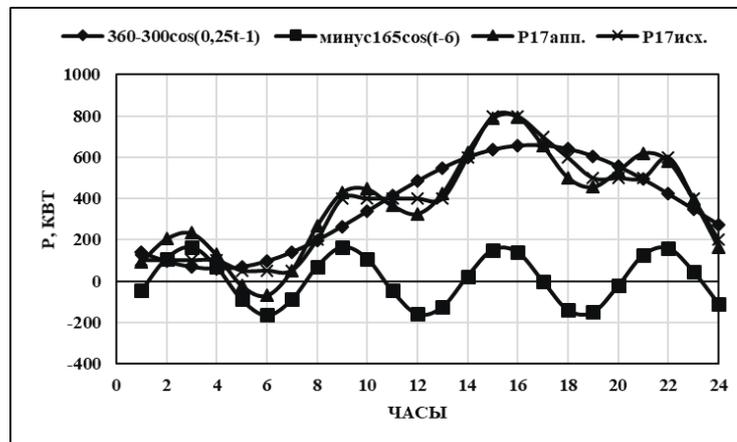


Рисунок А.17 – Графики исходный и функций уточнённой аппроксимации активной нагрузки трансформатора 17

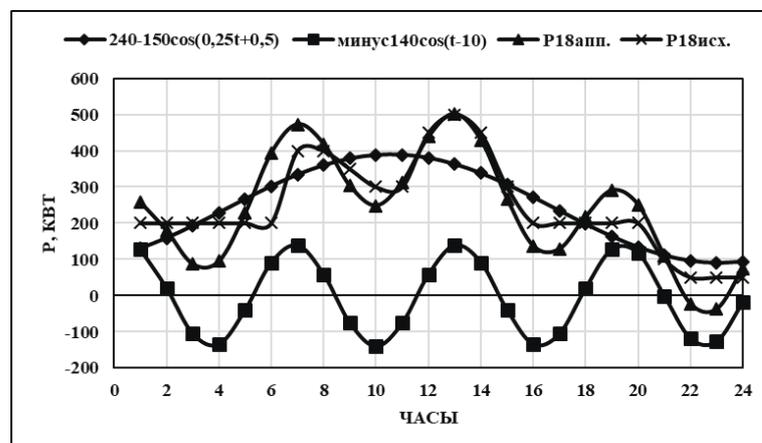


Рисунок А.18 – Графики исходный и функций уточнённой аппроксимации активной нагрузки трансформатора 18

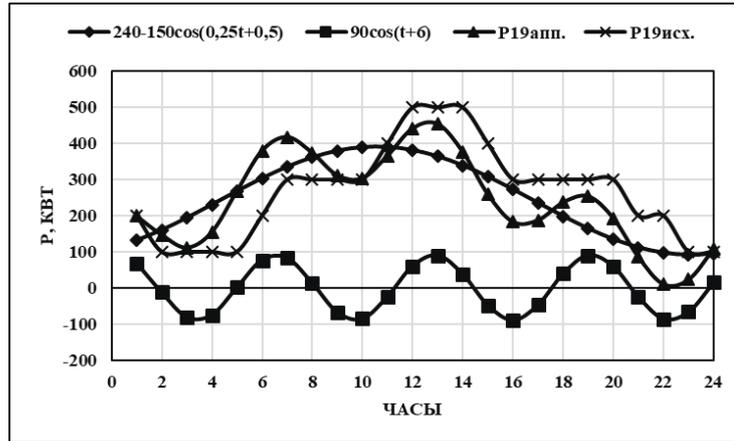


Рисунок А.19 – Графики исходный и функций уточнённой аппроксимации активной нагрузки трансформатора 19

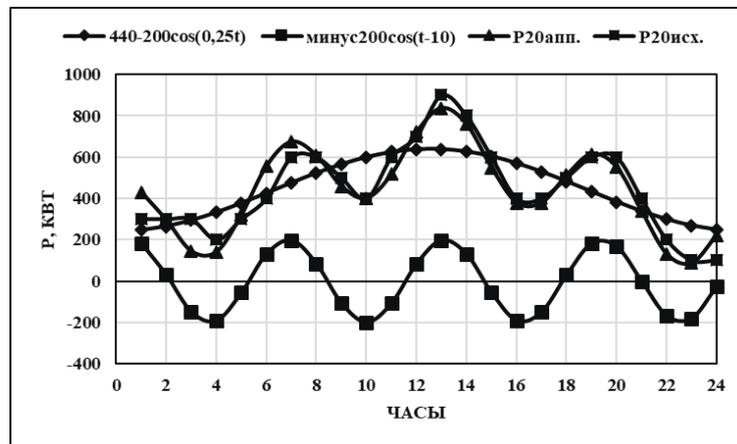


Рисунок А.20 – Графики исходный и функций уточнённой аппроксимации активной нагрузки трансформатора 20

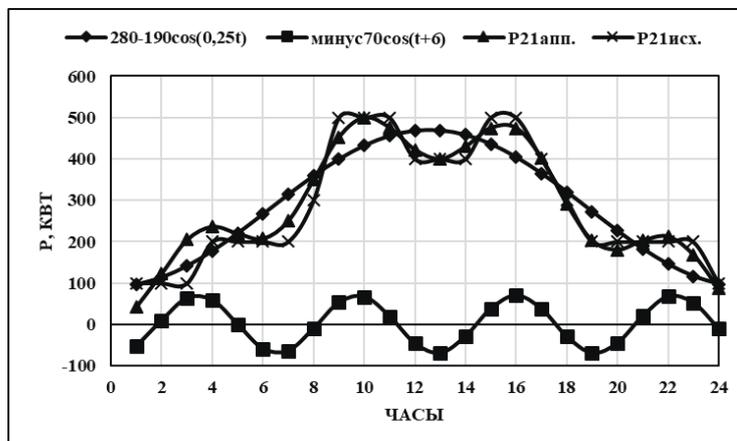


Рисунок А.21 – Графики исходный и функций уточнённой аппроксимации активной нагрузки трансформатора 21

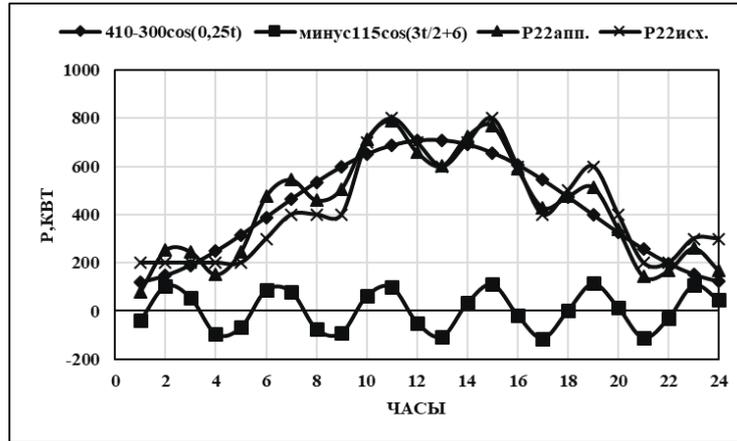


Рисунок А.22 – Графики исходный и функций уточнённой аппроксимации активной нагрузки трансформатора 22

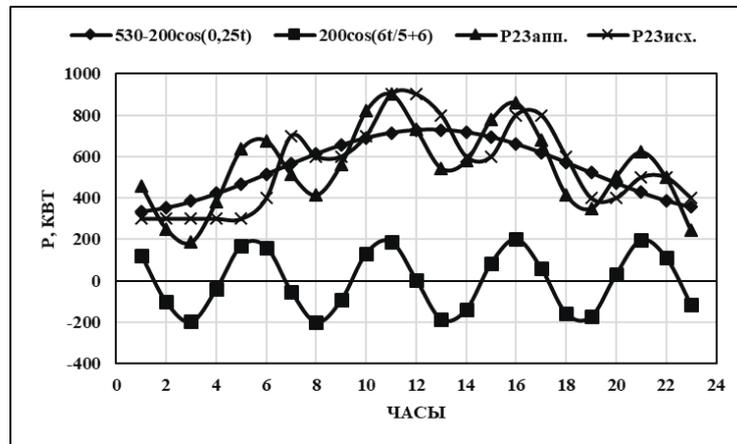


Рисунок А.23 – Графики исходный и функций уточнённой аппроксимации активной нагрузки трансформатора 23

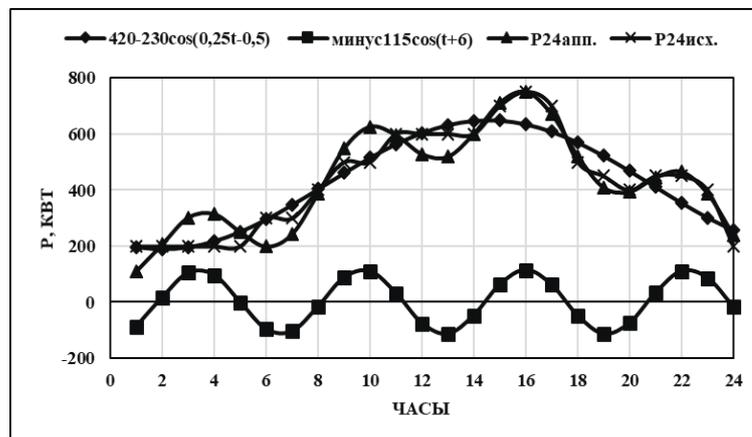


Рисунок А.24 – Графики исходный и функций уточнённой аппроксимации активной нагрузки трансформатора 24

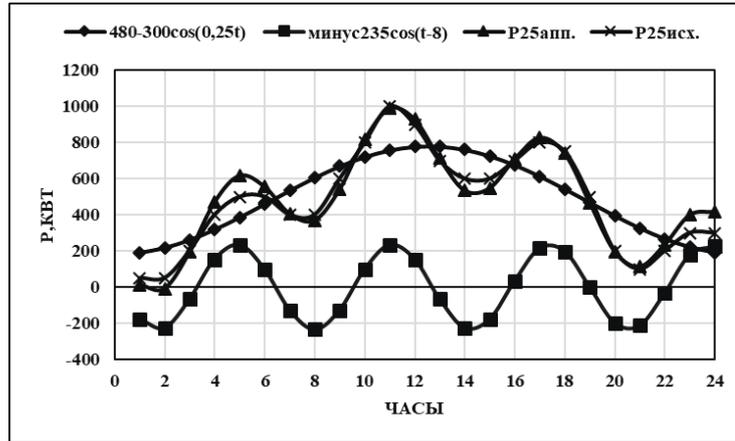


Рисунок А.25 – Графики исходный и функций уточнённой аппроксимации активной нагрузки трансформатора 25

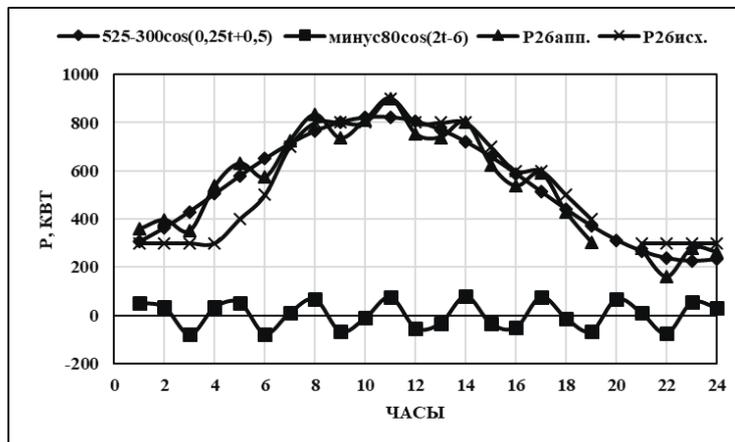


Рисунок А.26 – Графики исходный и функций уточнённой аппроксимации активной нагрузки трансформатора 26

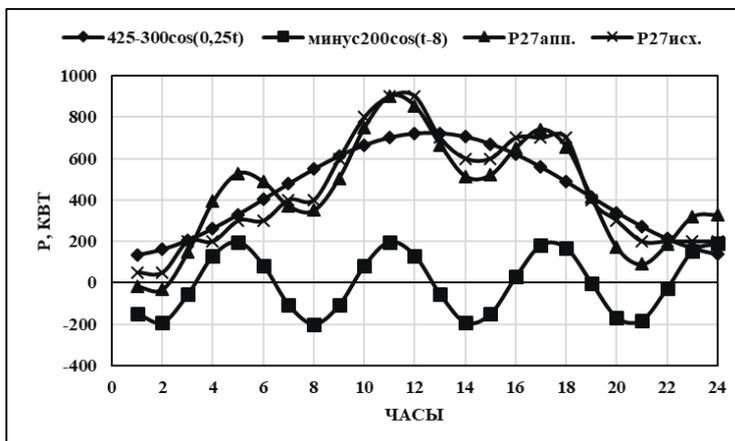


Рисунок А.27 – Графики исходный и функций уточнённой аппроксимации активной нагрузки трансформатора 27

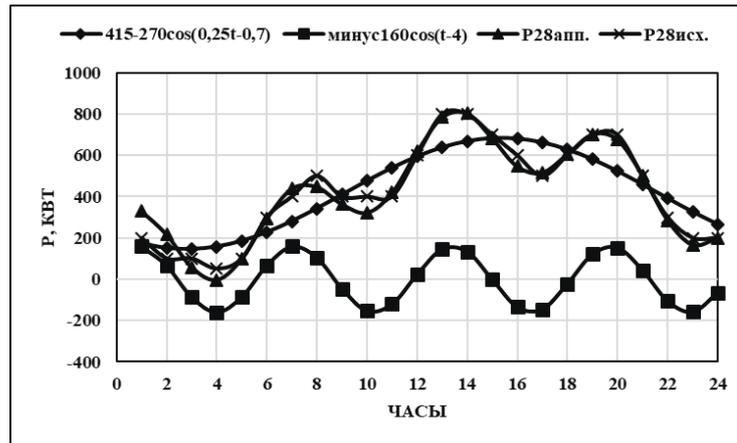


Рисунок А.28 – Графики исходный и функций уточнённой аппроксимации активной нагрузки трансформатора 28

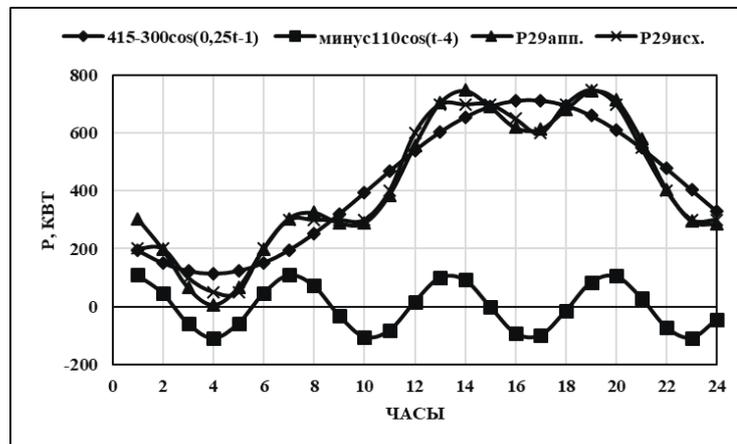


Рисунок А.29 – Графики исходный и функций уточнённой аппроксимации активной нагрузки трансформатора 29

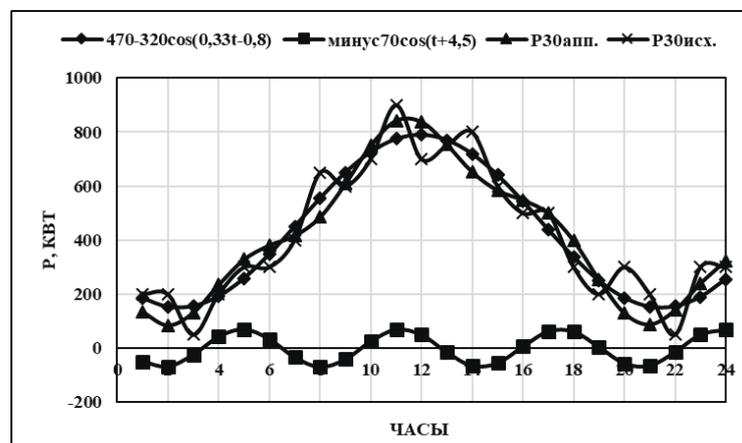


Рисунок А.30 – Графики исходный и функций уточнённой аппроксимации активной нагрузки трансформатора 30

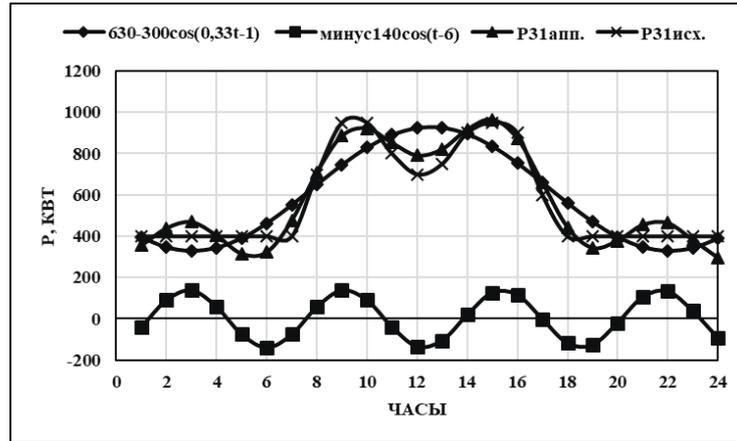


Рисунок А.31 – Графики исходный и функций уточнённой аппроксимации активной нагрузки трансформатора 31

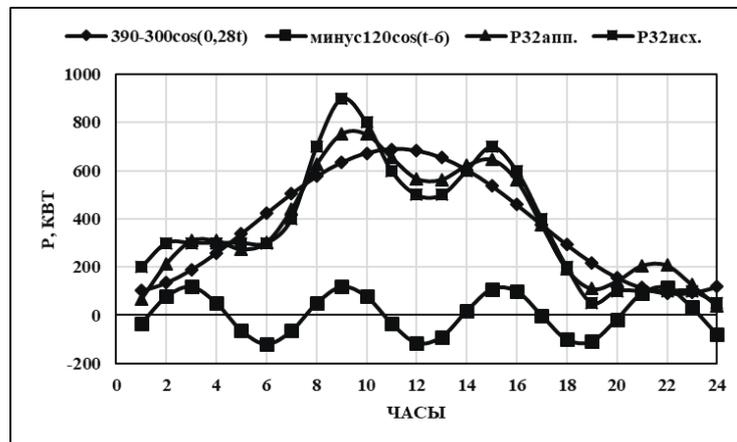


Рисунок А.32 – Графики исходный и функций уточнённой аппроксимации активной нагрузки трансформатора 32

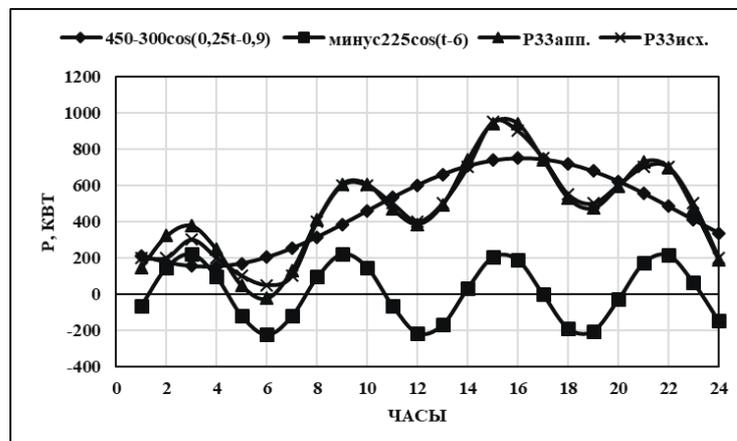


Рисунок А.33 – Графики исходный и функций уточнённой аппроксимации активной нагрузки трансформатора 33

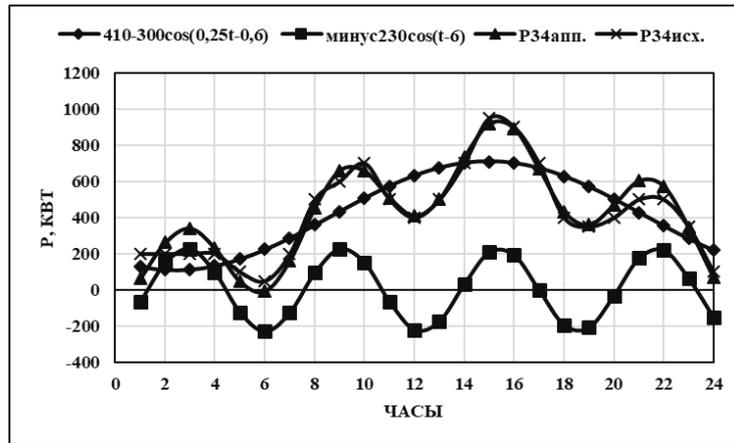


Рисунок А.34 – Графики исходный и функций уточнённой аппроксимации активной нагрузки трансформатора 34

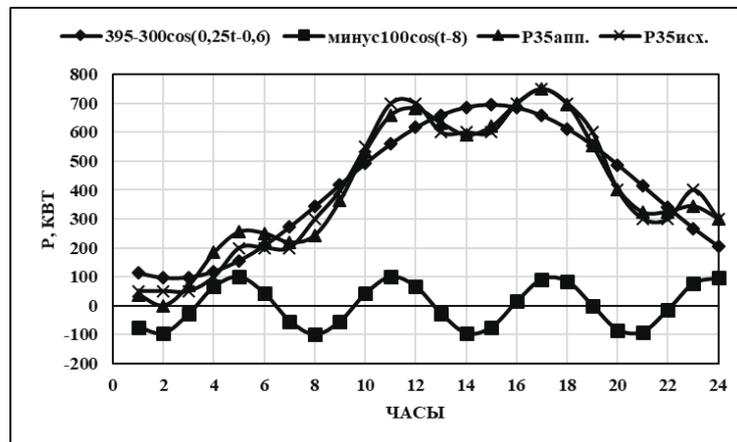


Рисунок А.35 – Графики исходный и функций уточнённой аппроксимации активной нагрузки трансформатора 35

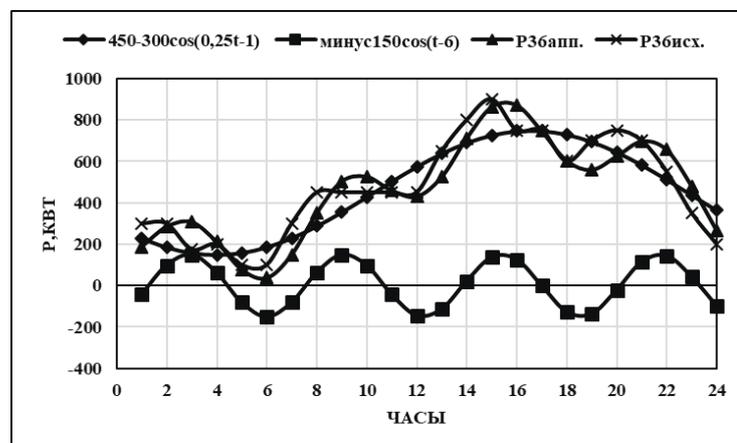


Рисунок А.36 – Графики исходный и функций уточнённой аппроксимации активной нагрузки трансформатора 36

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

**ТЕХНОЛОГИЯ ПРЯДИЛЬНО-ТКАЦКОЙ ФАБРИКИ**

Основным потребителем реактивной мощности на Пряديльно-ткацкой фабрике являются трёхфазные асинхронные двигатели, поэтому компенсация реактивной мощности является необходимым для производства.

**Б.1. Прядельное производство (16000 кВА)**

В прядельном производстве, как известно, такие материалы, как хлопок, лен, шерсть, натуральный шелк и химические волокна перерабатываются в готовые изделия. Технологические циклы, служащие для переработки данных волокон в готовую пряжу необходимой толщины и прочности:

1. Хлопок разрыхляют и очищают на аэродинамических разрыхлительно-трепальных машинах (3000 кВА). Далее смешивают в однородную массу и получают холст.
2. На чесальной машине (2500 кВА) холст очищают и расчёсывают на отдельные волокна.
3. Волокна соединяют и получают рыхлую ленту (1-3 см). Полученную рыхлую ленту транспортируют с помощью конвейера (2500 кВА) в цех получения ровницы.
4. На ровничных машинах (3500 кВА) поступившую ленту вытягивают и скручивают, образуя ровницу (тонкую ленту).
5. На прядельных машинах (4500 кВА) ровницу вытягивают, скручивают и получают пряжу (початок).

**Б.2. Ткацкое производство (15000 кВА)**

Ткачество является основным процессом технологических операций, дающих выработку тканей на ткацкой фабрике. Основные операции при этом – перематывание, шлихтование, увлажнение, запаривание пряжи. Ткань в результате

формируется из основной и уточной нитей. Основные этапы данной технологии выработки пряжи состоят из:

1. С прядильных початков на мотальных машинах (3000 кВА) нить перематывают на конические бобины.

2. Снование: нити с бобин навивают на сновальный вал (3500 кВА).

3. Шлихтование: нити с вала пропитываются клейким раствором–шлихтой.

Нити становятся эластичными и прочными.

4. Получение ткани: на ткацких станках (4000 кВА) происходит переплетение нитей основы с нитью утка.

5. Контроль качества:

5.1. Полученную суровую ткань измеряют на мерильных машинах (1500 кВА).

5.2. На браковочных машинах (1500 кВА) просматривают ткань на наличие дефектов.

5.3. Определяют сорт ткани, скручивают в рулоны, с помощью крутильных станок (1500 кВА) упаковывают и маркируют.

### **Б.3. Прочие (5000 кВА)**

Освещение, столовая, офисы, и т.д.

Все этапы производств представлены на рисунке Б.1.

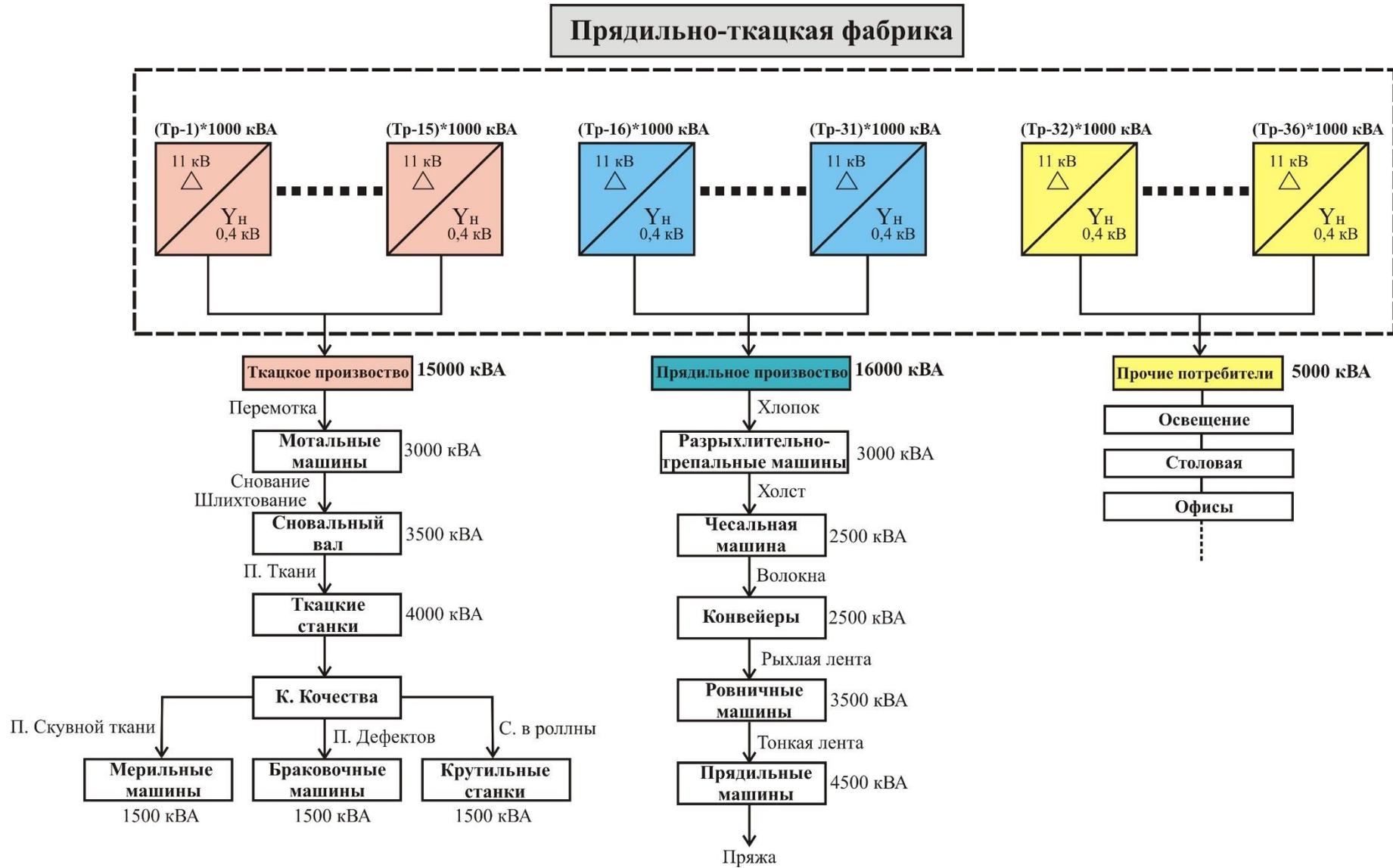


Рисунок Б.1 – Блок-схема технологических процессов Прядильно-ткацкой фабрики

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

## АКТЫ О ВНЕДРЕНИИ

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»  
(ФГБОУ ВО «КГЭУ»)

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор – проректор  
по учебной работе  
А. В. Леонтьев  
2023 г.



Акт о внедрении использования в учебном процессе ФГБОУ ВО «Казанский  
государственный энергетический университет» результатов исследований  
диссертационной работы Альзакара Ахмада

Настоящий акт подтверждает, что результаты исследований, полученные в диссертационной работе Альзакара А., представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.4.2 – «Электротехнические комплексы и системы» направлены на разработку способов регулирования потребления электроэнергии для повышения эффективности эксплуатации и увеличения срока службы силовых трансформаторов и используются в учебном процессе Казанского государственного университета при подготовке студентов, обучающихся по направлению 13.03.02 – «Электроэнергетика и электротехника» (Электроснабжение).

Использование результатов диссертационной работы позволяет повысить качество подготовки специалистов в области электроэнергетики.

Заведующий кафедрой  
«Электроснабжения промышленных предприятий»

д.т.н.



А.Р. Сафин



Сафина А.Р.  
М.П. Набибрахимова Д.А.



## АССОЦИАЦИЯ «РОСЭЛЕКТРОМОНТАЖ»

Юр. адрес: 123557, г. Москва, вн.тер.г. муниципальный округ  
Пресненский, пер. Электрический, д. 3/10, стр. 1, ком. 5, этаж 4  
Почтовый адрес президента: 420132, г. Казань, а/я 9  
Тел. (495) 899-00-96 E-mail: info@roselmon.su  
Http://www.roselmon.su

УТВЕРЖДАЮ

Президент



Ассоциации «Росэлектромонтаж»

д-р. техн. наук, проф.

Ю.И. Солюянов

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.

### АКТ О ВНЕДРЕНИИ

#### результатов диссертационного исследования Альзаккара Ахмада

Диссертационная работа Альзаккара А. посвящена решению актуальной научно-технической задачи регулирования потребления электроэнергии для повышения эффективности эксплуатации электрооборудования и увеличения срока службы силовых трансформаторов.

Результаты, представленные в диссертационном исследовании Альзаккара А., представляют практический интерес и приняты к использованию в экспертной деятельности Ассоциации «Росэлектромонтаж».

Результаты проведенных исследований показывают, что в условиях высоких температур (как правило, в летний период) необходимо контролировать изменение коэффициентов загрузки силовых трансформаторов и температуры нагревания обмоток, что является определяющим фактором изменения относительного срока службы силовых трансформаторов.

Ведущий специалист

Ассоциации «Росэлектромонтаж»

В.А. Халтурин

Рогова О.Э.  
rogova\_rem@mail.ru  
+7 (905) 318-38-02



«УТВЕРЖДАЮ»

Главный инженер

*[Handwritten Signature]*  
04 сентября 2023 г.  
Филиал  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ  
СЕТИ  
для документов

## АКТ

### О внедрении

#### результатов диссертационной работы Альзаккара Ахмада

Исследования, проведенные в диссертационной работе Альзаккаром А., позволяют решать задачи регулирования электропотребления, снижать потери электроэнергии в электрических сетях, повышать эффективность эксплуатации электрооборудования электрических сетей и систем электроснабжения, продлевать срок службы силовых трансформаторов различных классов напряжения.

Результаты исследований Альзаккара А. приняты к внедрению в АО «Сетевая компания» Приволжские электрические сети.

Применение полученных результатов и разработанных мероприятий позволяет снижать передаваемую реактивную мощность, а также загрузку электрических сетей и силовых трансформаторов, увеличивая их срок службы.

Начальник ОПК

*[Handwritten Signature]*

Р.Р. Садыков

**ПРИВОЛЖСКИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ**  
ФИЛИАЛ АКЦИОНЕРНОГО ОБЩЕСТВА «СЕТЕВАЯ КОМПАНИЯ»

422701, Республика Татарстан, Высокогорский район, Высокогорское сельское поселение,  
Промышленная зона Высокая Гора, д.41. тел. (843)241-00-59  
ИНН 165504111 КПП 161643001 Р/с 40602810343240000010 Филиал Банка ВТБ (ПАО) в г. Нижнем Новгороде  
Кор. / счет 30101810200000000837 БИК 042202837 e-mail: office\_pes@gridcom-rt.ru

