

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»

**Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Казань – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Казанский государственный энергетический университет»

Научный руководитель:

Грачева Елена Ивановна

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»

Официальные оппоненты:

Суслов Константин Витальевич,

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет "МЭИ"»

Куделина Дарья Васильевна,

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры инфраструктурных энергетических систем ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Братский государственный университет», г. Братск

Защита состоится 11 октября 2024 г. в 13:00 на заседании диссертационного совета 24.2.321.01 на базе ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» по адресу: г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, тел.: +7 (3842) 39-69-50, e-mail: markovso@kuzstu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» и на сайте: <http://science.kuzstu.ru/wp-content/docs/OAD/Soresearchers/2024/alz/Dissertation.pdf>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2024 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



С.О. Марков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. 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), подаваемой 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 – A. 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», 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» ИРНТУ, г. Иркутск, 2023 г.; на Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения», Казань, КГЭУ, 2023 г.; на международной научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг» 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследования, цели, методы исследования, научная новизна и практическая значимость работы, основные научные положения, выносимые на защиту, представлена структура работы.

В первой главе проанализированы проблемы потребления электроэнергии (ЭЭ) в промышленности с помощью выравнивания графиков нагрузки. Представлены основные параметры, виды Потребителей-регуляторов и требования к надёжности электроснабжения потребителей при выравнивании графиков нагрузок. Показана экономическая эффективность регулирования потребления ЭЭ при использовании методики выбора получасового максимума нагрузки.

Вторая глава посвящена анализу и исследованию электропотребления объектов промышленной зоны г. Адра Сирийской Арабской Республики (САР). Промышленные предприятия в г. Адра питаются от подстанции (ПС) «Кабун-1» на 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 и Прядильно-ткацкая (Пряд-ткац.) фабрика. Потребителем наибольшей мощности является Пряд-ткац. фабрика, работающая в двухсменном режиме. На фабрике установлены 36 трансформаторов с $S_{ном}=1$ МВА.

Фабрика получает питание от ПС «Кабун-1» по кабельным линиям на $U_{ном}=11$ 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 кВ и 0,4 кВ – радиальные.

Разработан алгоритм оценки относительной величины срока службы $T_{с.сл}^*$ – отношение реального срока службы к паспортному ($T_{с.сл}^*=T_{реал}/T_{пас}$), трансформаторов 33/11 кВ ПС «Кабун-1», с учетом коэффициента загрузки и различных условий окружающей среды. Определены модели аппроксимирующих функций температуры установившегося перегрева, зависящих от коэффициентов загрузки трансформаторов.

При исследовании степенной, линейной и экспоненциальной функций аппроксимации и оценке их коэффициентов детерминации (R^2) установлено, что 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.

На рисунке 1а представлены графики изменения температуры перегрева обмоток и масла трансформаторов 33/11 кВ ПС «Кабун-1» в зависимости от коэффициента загрузки и их функции аппроксимации.

На рисунке 1б представлен график изменения температуры нагрева обмоток трансформаторов 33/11 кВ ПС «Кабун-1» в зависимости от коэффициента загрузки.

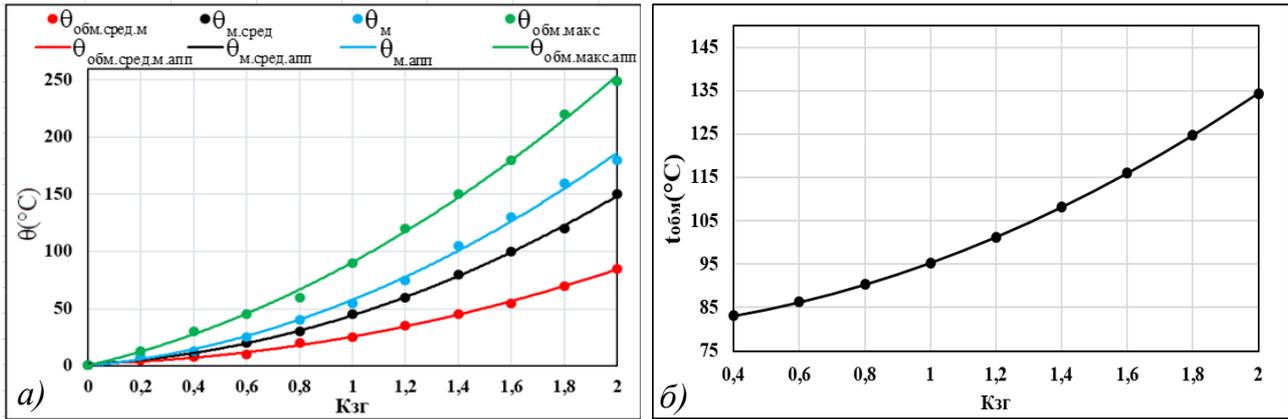


Рисунок 1 – Графики функций температурных параметров трансформаторов 33/11 кВ ПС «Кабун-1»:

а) функции перегрева масла и обмотки; б) функция нагрева обмотки

На рисунке 1 показано:

$\theta_{обм.сред.м}$ – значение температуры среднего перегрева обмотки сверх температуры масла, аппроксимирующая функция

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

$\theta_{м.сред}$ – значение температуры среднего перегрева масла сверх температуры охлаждающего воздуха, аппроксимирующая функция

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

$\theta_{м}$ – значение температуры перегрева масла сверх температуры охлаждающего воздуха, аппроксимирующая функция

$$\theta_{м} = 35,4K_{зг}^2 + 22,3K_{зг} + 0,1. \quad (3)$$

$\theta_{обм.макс}$ – значение температуры перегрева наиболее нагретой точки обмотки сверх температуры охлаждающего воздуха, аппроксимирующая функция

$$\theta_{обм.макс} = 36,4K_{зг}^2 + 54K_{зг} + 0,4. \quad (4)$$

$t_{обм.сред}$ – значение температуры среднего нагрева обмотки сверх температуры охлаждающего воздуха, где

$$t_{обм.сред} = \theta_{о.с.эkv} + \theta_{обм.сред}. \quad (5)$$

Определим значение температуры среднего перегрева обмотки сверх температуры охлаждающего воздуха

$$\theta_{обм.сред} = \theta_{обм.сред.м} + \theta_{м.сред}. \quad (6)$$

Определим перегрев обмотки и масла трансформатора при изменении нагрузки

$$\theta_{кон}(t) = \theta_{нач} e^{-\left(\frac{t}{T_0}\right)} + \theta_{кон} \left[1 - e^{-\left(\frac{t}{T_0}\right)}\right]. \quad (7)$$

С помощью (1), (2) и (7)

$$\theta_{обм.сред.м}(t) = \theta_{нач} e^{-\left(\frac{t}{T_0}\right)} + (17,5K_{зг}^2 + 6,1K_{зг} + 2) \left(1 - e^{-\left(\frac{t}{T_0}\right)}\right). \quad (8)$$

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

Подставим (8) и (9) в (6), тогда значение температуры среднего нагрева обмотки в конце периода t

$$\theta_{\text{обм.сред}}(t) = 2 \theta_{\text{нач}} e^{-\left(\frac{t}{T_0}\right)} + (48,3K_{\text{ЗГ}}^2 + 18K_{\text{ЗГ}} + 3,6) \left(1 - e^{-\left(\frac{t}{T_0}\right)}\right). \quad (10)$$

С помощью выражения (5) и, принимая во внимание следующие условия:

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

Получим температуру нагревания обмотки в конце часа (рисунок 1б)

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

На рисунке 2 представлены суточные исходные и аппроксимированные графики коэффициентов загрузки трансформаторов 33/11 кВ ПС «Кабун-1» – без учета и с учетом компенсирующих устройств (КУ).

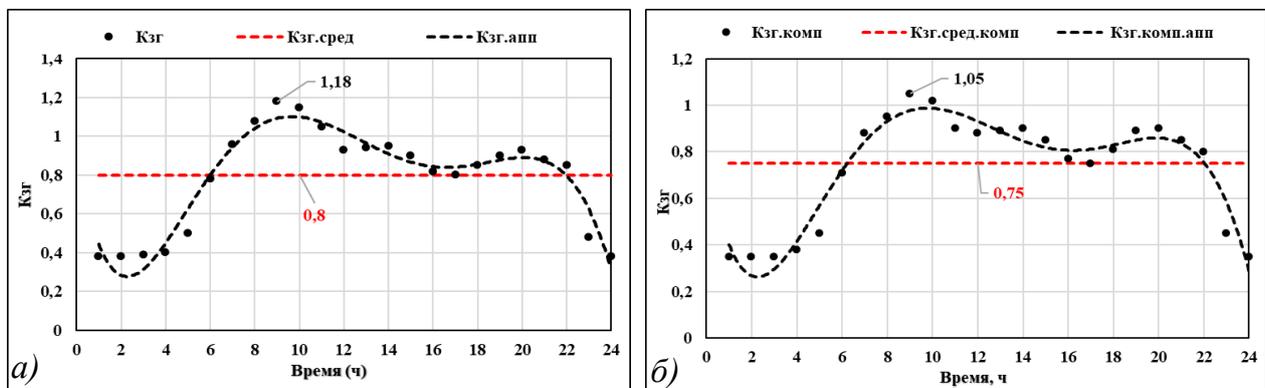


Рисунок 2 – Суточные исходные и аппроксимированные графики коэффициентов загрузки трансформаторов 33/11 кВ ПС «Кабун-1»:
а) без учета КУ; б) с учетом КУ

На рисунке 2 показано:

графики ($K_{\text{ЗГ}}; K_{\text{ЗГ.КОМП}}$) – суточное изменение исходного значения коэффициента загрузки трансформатора без учета и с учетом КУ (получено с помощью измерительного цифрового прибора ДМК 2Х);

графики ($K_{\text{ЗГ.АПП}}; K_{\text{ЗГ.КОМП.АПП}}$) – суточное изменение аппроксимированного значения исходного коэффициента загрузки трансформатора без учета и с учетом КУ;

графики ($K_{\text{ЗГ.СРЕД}}; K_{\text{ЗГ.СРЕД.КОМП}}$) = (0,80; 0,75) – средние значения коэффициента загрузки без учета и с учетом КУ.

На рисунке 3 представлены исходные и аппроксимированные суточные графики температуры нагрева обмоток трансформаторов ПС «Кабун-1» – без учета и с учетом компенсирующих устройств (КУ).

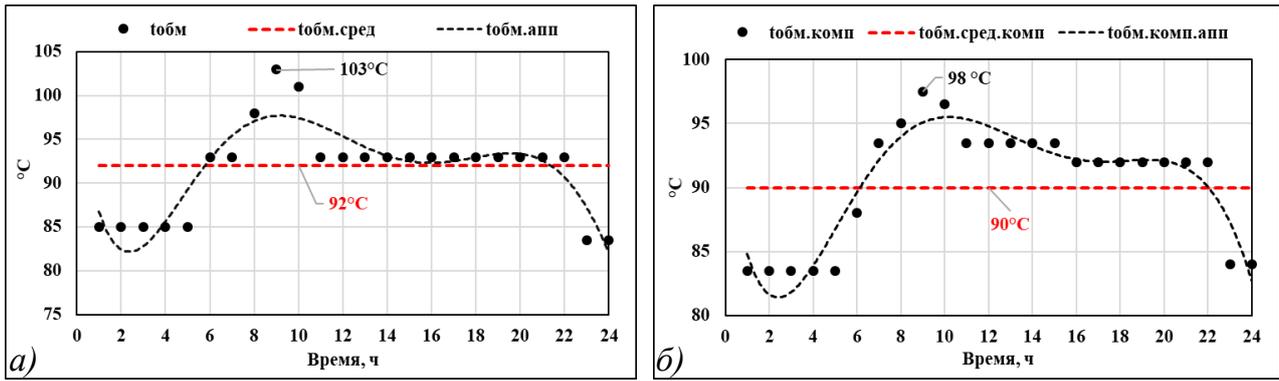


Рисунок 3 – Суточные графики температуры нагрева обмоток трансформаторов 33/11 кВ ПС «Кабун-1»: а) без учета КУ; б) с учетом КУ

На рисунке 3 показано:

графики $(t_{обм}; t_{обм.комп})$ – суточное изменение исходной температуры нагрева обмотки трансформатора без учета и с учетом КУ;

графики $(t_{обм.апп}; t_{обм.комп.апп})$ – суточное изменение аппроксимированного значения исходной температуры нагрева обмотки трансформатора без учета и с учетом КУ;

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

На рисунке 4а представлен график $T_{с.сл}^*$ в зависимости от температуры среднего нагрева $(t_{обм.сред})$ при использовании «шестиградусного правила». Согласно данного правила, при увеличении температуры нагрева на $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ по отношению к допустимому значению ($85\text{ }^{\circ}\text{C}$), относительный срок службы уменьшается в два раза и наоборот – при снижении температуры увеличивается, аппроксимирующая функция

$$T_{с.сл}^* = -0,125t_{обм.сред} + 11,79 . \quad (12)$$

На рисунке 4б представлен график $T_{с.сл}^*$ в зависимости от коэффициента загрузки, полученный с помощью (11) и (12) и его функция

$$T_{с.сл}^* = -1,46K_{зг}^2 - 0,5K_{зг} + 1,83 . \quad (13)$$

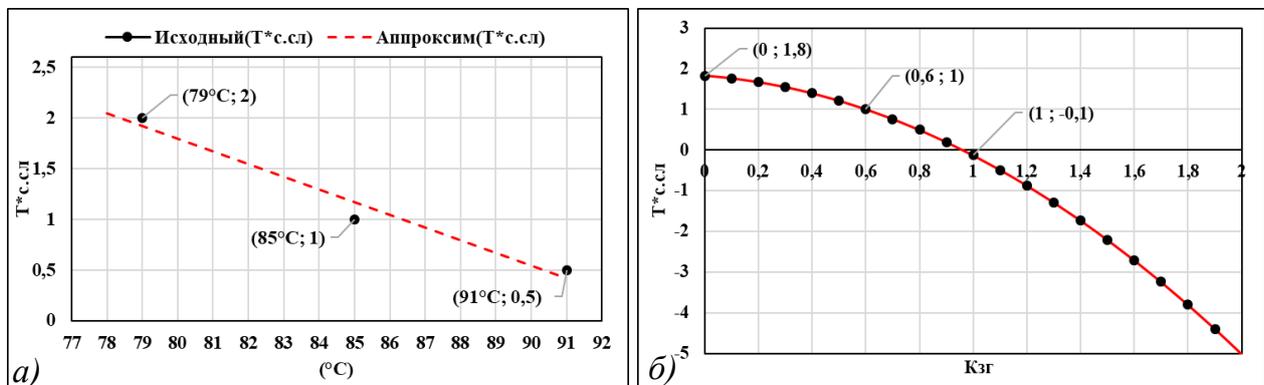


Рисунок 4 – Графики изменения относительного срока службы изоляции обмотки трансформатора в зависимости от:

а) величины температуры среднего нагрева; б) величины коэффициента загрузки

Определены величины $T_{с.сл}^*$ согласно (13) для различных режимов загрузки трансформатора:

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

$$T_{с.сл}^* = -1,46(0,80)^2 - 0,5(0,80) + 1,83 = 0,5 . \quad (14)$$

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

$$T_{с.сл}^* = -1,46(0,75)^2 - 0,5(0,75) + 1,83 = 0,63 . \quad (15)$$

С помощью (12) определены значения температуры среднего нагрева обмотки:

1. Без учета КУ (полная мощность нагрузки)

$$T_{с.сл}^* = 0,5 \Rightarrow t_{обм.сред} = \frac{11,79-0,5}{0,125} = 92 \text{ } ^\circ\text{C} . \quad (16)$$

2. С учётом КУ

$$T_{с.сл}^* = 0,63 \Rightarrow t_{обм.сред} = \frac{11,79-0,63}{0,125} = 90 \text{ } ^\circ\text{C} . \quad (17)$$

Основные характеристики исследуемых графических зависимостей представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения температуры нагрева обмоток и срока службы трансформаторов ПС «Кабун-1»: 1. без учета КУ; 2. с учётом КУ

| Основные режимы электропотребления нагрузками | $K_{зг.сред}$ | $t_{обм.сред}$ | $T_{с.сл}^*$ |
|---|---------------|----------------|--------------|
| 1. Без учета КУ (полная мощность нагрузки) | 0,8 | 92 °C | 0,5 |
| 2. С учётом КУ | 0,75 | 90 °C | 0,63 |

Для оценки значения температуры среднего нагрева обмотки трансформаторов (таблица 1), проведено имитационное моделирование схемы электроснабжения с трансформаторами 33/11 кВ ПС «Кабун-1» на основе пакета «SimPowerSystems» интерактивной среды MATLAB/Simulink (рисунок 5).

Проведенные исследования показывают совпадение результатов расчета при помощи имитационного моделирования и разработанного аналитического выражения (таблица 1) для вычисления значения температуры среднего нагрева обмотки трансформатора (без учета и с учетом компенсирующих устройств) с погрешностью, не превышающей 1 %. С помощью (11), функция температуры среднего нагрева обмотки трансформаторов TP1 и TP2

$$t_{обм.сред} = 11,7 \left(\frac{I}{1050} \right)^2 + 4 \left(\frac{I}{1050} \right) + 79,7 ; \quad (18)$$

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

где I – ток вторичной обмотки трансформатора, рассчитанный в среде MATLAB /Simulink.

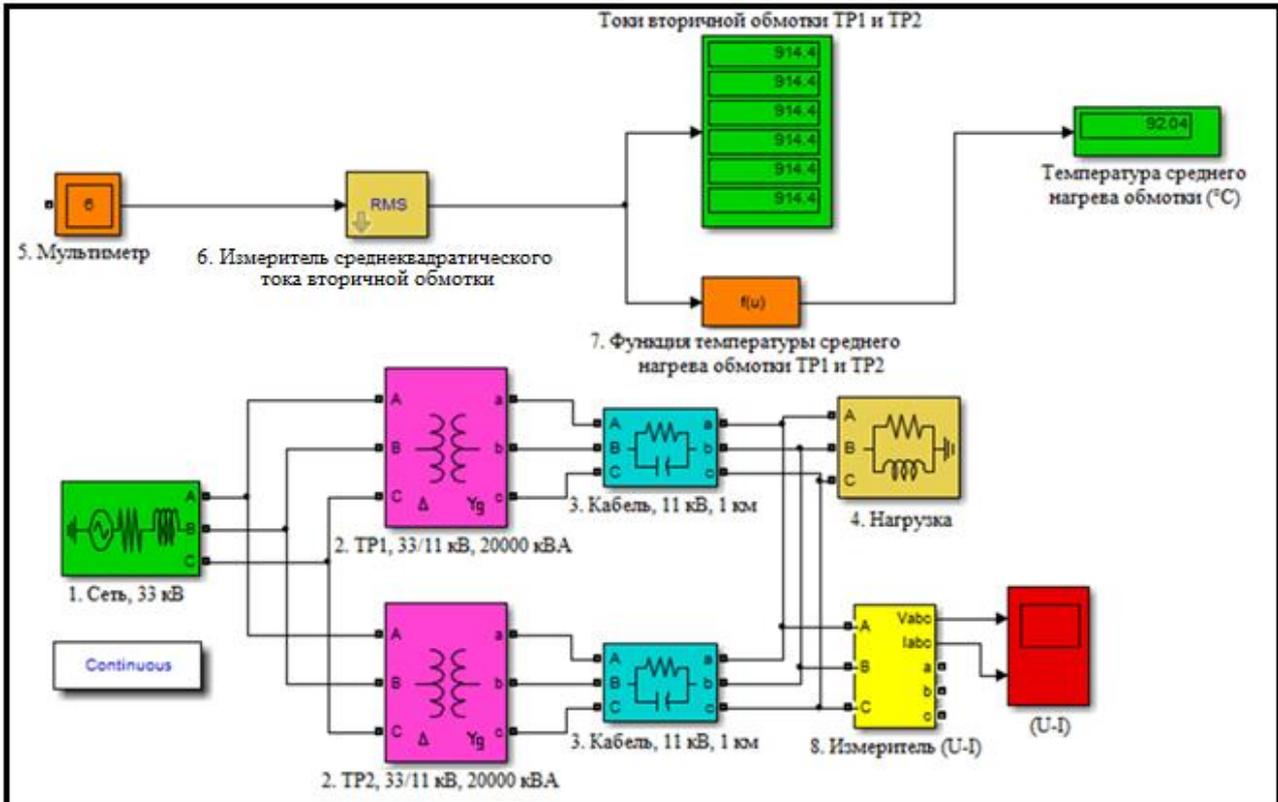


Рисунок 5 – Схема модели ПК «Кабун-1», реализованная в среде MATLAB /Simulink

Третья глава посвящена исследованию статистических характеристик исходных графиков нагрузок электропотребителей ПК «Кабун-1» и их возможных аппроксимирующих функций (первое и второе приближение).

Функцию, аппроксимирующую графики активной нагрузки в первом приближении с периодом $T^{[1]} = 24$ ч для трансформатора 25 и суммарная функция для 36 трансформаторов, можно представить как

$$\Phi^{[1]}(t)_{\text{ТР25}} = B_P^{[1]} - A_P^{[1]} \cdot \cos(\omega^{[1]}t) = 460 - 440 \cos(0,25t)$$

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

$$A_P^{[1]} \approx 0,5(P_{\text{макс}} - P_{\text{мин}}); \quad B_P^{[1]} \approx M_P^{[1]} \approx M_P;$$

$$\omega^{[1]} = \left(\frac{2\pi}{T^{[1]}}\right); \quad j_0^{[1]} = 2\pi \cdot t_0 \cdot \omega^{[1]};$$

(19)

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

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

где $f_{\text{исх}}(t)$ – исходная функция; $A_P^{[1]}$ – амплитуда косинуса в первом приближении; M_P – среднее значение за сутки исходного графика активной нагрузки, полученное по статистическим данным; $B_P^{[1]} \approx M_P^{[1]}$ – среднее значение за сутки графика аппроксимации мощности нагрузки в первом приближении; $\omega^{[1]}$ – угловая частота в первом приближении; $j_0^{[1]}$ – постоянная величина начальной фазы в первом приближении; t_0 – время наступления начальной фазы; $\delta_R^{[1]}$ – значение

среднеквадратического отклонения разностей в первом приближении; $M_R^{[1]}$ – средние значения разностей между исходным графиком и аппроксимирующей функцией в первом приближении.

На рисунке 6 показаны суточные исходные графики активной нагрузки трансформаторов 33/11 кВ Пряд-ткац. фабрики и их аппроксимация в первом приближении для трансформатора 25 (имеющего наибольший K_{3T}) и суммарный график для 36 трансформаторов.

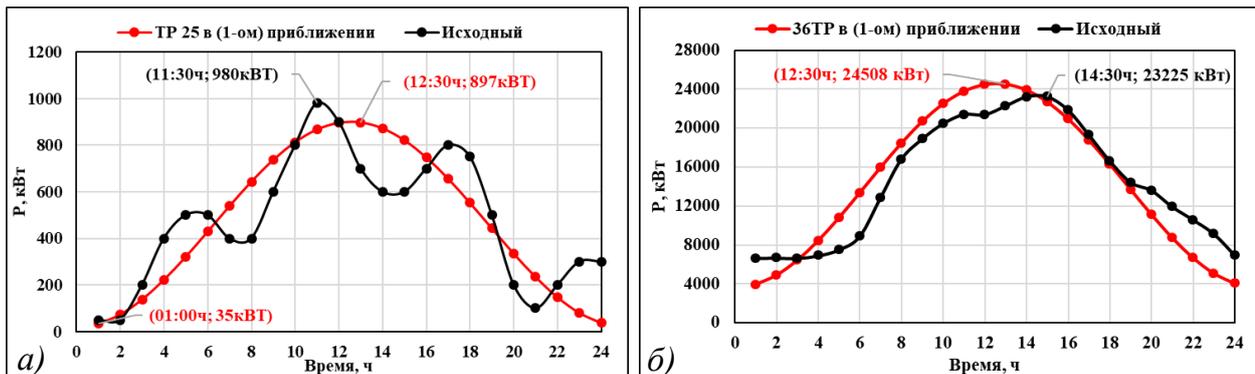


Рисунок 6 – Суточные исходные и аппроксимированные графики активной мощности нагрузок Прядильно-ткацкой фабрики в первом приближении для: а) трансформатора 25 – $\Phi^{[1]}(t)_{TP25}$; б) 36 трансформаторов – $\Phi^{[1]}(t)_{сумм}$

Рисунок 6б показывает, что при практическом совпадении средних значений графиков мощности нагрузки, наблюдается значительная разница в максимальных значениях.

Максимальная нагрузка исходного графика наблюдается в 14:30 ч, а аппроксимированного – в 12:30 ч, поэтому требуется уточнение аппроксимации. При этом установлено, что для аппроксимации суточных графиков активной мощности нагрузок трансформаторов во втором приближении целесообразно использовать сумму гармонических функций – первую функцию с периодом $T_1^{[2]} = 24$ ч, и вторую функцию с периодом $T_2^{[2]} = 6$ ч.

Во втором приближении функция косинус имеет разные аргументы, поэтому можно найти только функцию аппроксимации для каждого трансформатора из 36 трансформаторов.

Функцию, аппроксимирующую графики активной нагрузки во втором приближении для трансформатора 25 и суммарная функция для 36 трансформаторов, можно представить как

$$\begin{aligned} \Phi^{[2]}(t)_{TP25} &= B_{P1}^{[2]} - A_{P1}^{[2]} \cdot \cos(\omega_1^{[2]}t + j_{01}^{[2]}) + A_{P2}^{[2]} \cdot \cos(\omega_2^{[2]}t + j_{02}^{[2]}); \\ \Phi^{[2]}(t)_{TP25} &= 480 - 300 \cos(0,25t) - 235 \cos(t - 8); \\ \Phi^{[2]}(t)_{сумм} &= (\text{косинус имеет разные аргументы}). \end{aligned} \quad (20)$$

На рисунке 7 показаны суточные исходные графики активной нагрузки Пряд-ткац. фабрики и их аппроксимация во втором приближении для трансформатора 25 и суммарный график для 36 трансформаторов.

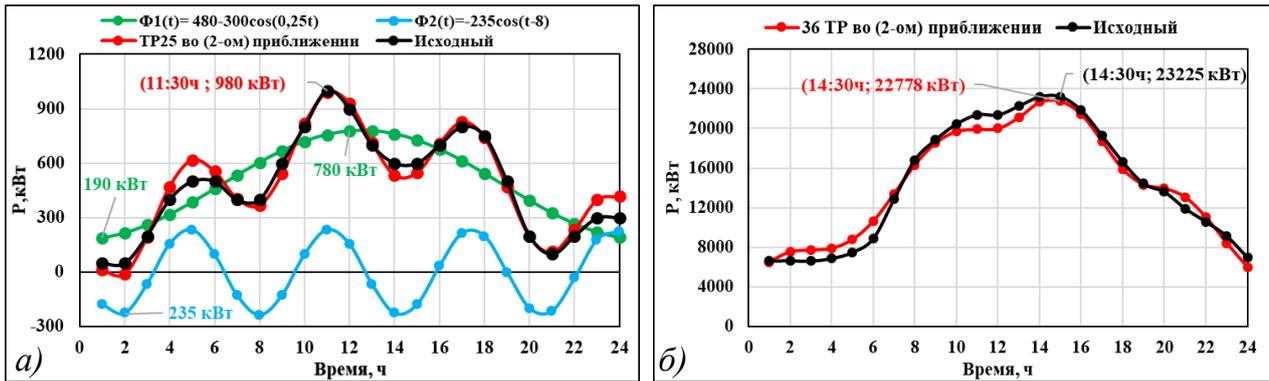


Рисунок 7 – Суточные исходные и аппроксимированные графики активной мощности нагрузок Прядильно-ткацкой фабрики во втором приближении для:

а) трансформатора 25 – $\Phi^{[2]}(t)_{TR25}$; б) 36 трансформаторов – $\Phi^{[2]}(t)_{сумм}$

Рисунок 7б показывает совпадение между исходными и аппроксимированными графиками, особенно, во время максимума. В таблице 2 представлены результаты расчетов погрешностей 36 трансформаторов 11/0,4 кВ Пряд-ткац. фабрики в первом и втором приближении.

Таблица 2 – Аргументы функции аппроксимации в первом и втором приближении суточных графиков активной мощности нагрузок трансформаторов 11/0,4 кВ Прядильно-ткацкой фабрики

| 36 ТР | Средняя разность | | | | Среднеквадратическая погрешность | | | |
|----------|-------------------|-------------------|---------------|---------------|----------------------------------|------------------------|--------------------|--------------------|
| | $M_R^{[2]}$, кВт | $M_R^{[1]}$, кВт | $M_R^{[2]}$ % | $M_R^{[1]}$ % | $\delta_R^{[2]}$, кВт | $\delta_R^{[1]}$, кВт | $\delta_R^{[2]}$ % | $\delta_R^{[1]}$ % |
| Сред | -0,13 | 2 | -0,03 | 0,42 | 68 | 121 | 17,2 | 30 |

В таблице 3 представлено сравнение значений исходного, первого и второго приближения суточных графиков активной мощности нагрузок Пряд-ткац. фабрики.

Таблица 3 – Статистические параметры исходных и аппроксимированных графиков активной мощности трансформаторов 11/0,4 кВ Прядильно-ткацкой фабрики

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

Установлено, для второго приближения выявлена достаточно точная степень совпадения графиков, оценка погрешностей, время и значение максимума мощности – в соответствии с данными таблицами 2 и 3. С учётом технологических циклов производства продукции, фабрику можно разделить на три относительно автономные технологические части: ткацкое производство, прядильное

производство и прочие потребители. Аппроксимированные функции для графиков нагрузок ткацкого, прядильного производств, прочих потребителей и суммарного

$$\begin{aligned}\Phi(t)_{\text{ткац}} &= 5,7 - 3,5 \cos(0,25t); \\ \Phi(t)_{\text{пряд}} &= 6,6 - 3,8 \cos(0,25t); \\ \Phi(t)_{\text{проч}} &= 2,1 - 1,9 \cos(0,25t); \\ \Phi(t)_{\text{сумм.апп.фаб.комп}} &= \Phi(t)_{\text{ткац}} + \Phi(t)_{\text{пряд}} + \Phi(t)_{\text{проч}}; \\ \Phi(t)_{\text{сумм.апп.фаб.комп}} &= 14,4 - 9,2 \cos(0,25t).\end{aligned}\quad (21)$$

В таблице 4 и 5 приведены расчетные параметры исходных (исх.) и аппроксимированных (апп.) графиков полной мощности нагрузок для основных производств Пряд-ткац. фабрики.

Таблица 4 – Расчетные параметры суточных исходных и аппроксимированных графиков полной мощности нагрузок для основных производств Прядильно-ткацкой фабрики

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

Таблица 5 – Расчетные параметры исходных и аппроксимированных графиков полной мощности нагрузок производств Прядильно-ткацкой фабрики с учетом КУ

| Показатель | Ткацкое | | Прядильное | | 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 |
| $S_{\text{макс}}$, МВА | 9,50 | 9,18 | 10,25 | 10,38 | 4 | 3,99 | 23,3 | 23,54 |
| $K_{\text{зн}}$ | 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 |
| σ_s , МВА | 2,41 | 2,42 | 2,73 | 2,62 | 0,99 | 1,31 | 6,02 | 6,34 |
| γ | 0,42 | 0,42 | 0,42 | 0,40 | 0,46 | 0,62 | 0,42 | 0,43 |
| τ , ч | 14:30 | 12:30 | 12:30 | 12:30 | 15:30 | 12:30 | 15:30 | 13:30 |

где τ – время максимума; σ_s – среднеквадратическое отклонение полной мощности нагрузки; γ_s – вариация полной мощности нагрузки; $K_{\text{зн}}$ – коэффициент заполнения графика нагрузки.

Исходные и аппроксимированные графики нагрузок для основных производств Прядельно-ткацкой фабрики показаны на рисунке 8.

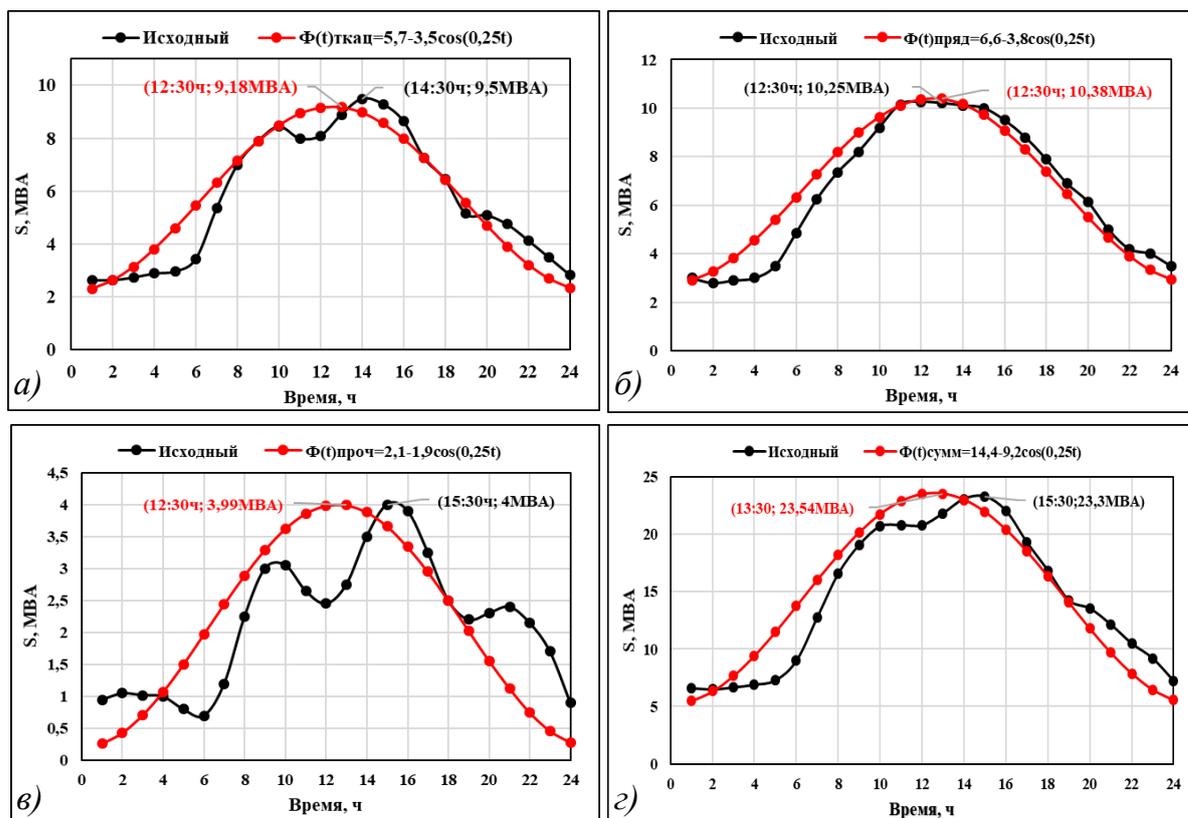


Рисунок 8 – Исходный и аппроксимированный графики полной мощности нагрузок:

а) ткацкого производства; б) прядельного производства;
в) прочих потребителей; г) суммарный

На рисунке 8 показано, что для прядельного производства аппроксимированные графики нагрузок – достаточно достоверные; для ткацкого производства, а также прочих потребителей аппроксимация недостаточно точная – особенно в несовпадении максимумов нагрузок; суммарный аппроксимированный график нагрузки Прядельно-ткацкой фабрики сдвинут назад на 2 часа с (15:30 ч) до (13:30 ч).

Четвертая глава посвящена разработке мероприятий по регулированию потребления ЭЭ путем выравнивания графиков нагрузок трансформаторов 33/11 кВ ПС «Кабун-1»: установка КУ на стороне низшего напряжения трансформаторов Пряд-ткац. фабрики; сдвиг времени начала работы ткацкого производства с 5:30 ч на 12:30 ч – вариант 1 (вар.1); сдвиг времени начала работы ткацкого производства с 5:30 ч на 12:30 ч и прядельного производства с 5:30 ч на 22:30 ч – вариант 2 (вар.2); сдвиг времени начала работы Механической мастерской с 7:30 ч на 23:30 ч; сдвиг времени начала работы Завода соков с 8:30 ч на 00:30 ч. Вариант 3 (вар.3) является – суммой предлагаемых мероприятий.

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).

Алгоритм оценки срока службы трансформаторов ПС «Кабун-1» с учетом сдвига времени начала работы (вар.3) включает в себя определение: суммарной полной мощности нагрузок ПС «Кабун-1» ($S_{\text{сумм.Каб.вар.3}}$); коэффициентов загрузки трансформаторов ($K_{\text{зг.вар.3}}$); температуры нагрева обмоток ($t_{\text{обм.вар.3}}$).

На рисунке 9 показаны суточные графики полной мощности нагрузок – исходный, вариант 2 и вариант 3 для объектов промышленной зоны ПС (Кабун-1).

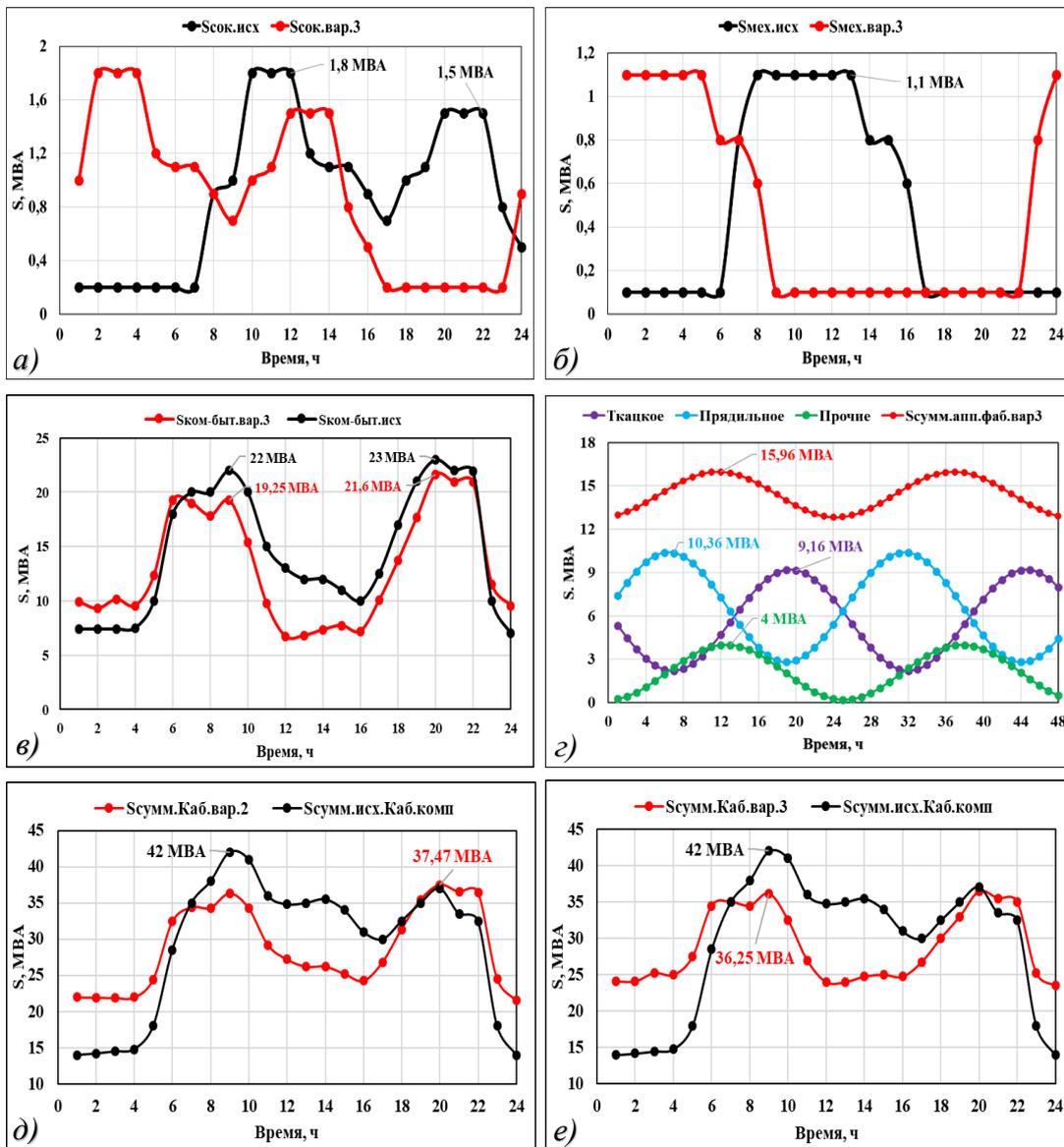


Рисунок 9 – Суточные графики полной мощности нагрузок – исходный, вариант 2 и вариант 3:

а) Завод соков; б) Механическая мастерская; в) Коммунально-бытовые; г) производства (Ткацкое; Прядильное; прочие); д) суммарная полная мощность нагрузок ПС «Кабун-1» – вариант 2; е) суммарная полная мощность нагрузок ПС «Кабун-1» – вариант 3

Согласно данным главы 3 получены аппроксимирующие функции полной мощности для производств фабрики (Ткацкого; Прядильного; прочих) и добавлен сдвиг времени начала работы (рисунок 9з)

$$\begin{aligned} S_{\text{ткац.вар.3}} &= 5,7 - 3,5 \cos(0,25t - 8); \\ S_{\text{пряд.вар.3}} &= 6,6 - 3,8 \cos(0,25t - 5); \\ S_{\text{проч.вар.3}} &= 2,1 - 1,9 \cos(0,25t), \end{aligned} \quad (22)$$

где $S_{\text{ткац.вар.3}}$ – полная мощность нагрузок ткацкого производства для третьего варианта; $S_{\text{пряд.вар.3}}$ – полная мощность нагрузок прядильного производства для третьего варианта; $S_{\text{проч.вар.3}}$ – полная мощность нагрузок прочих потребителей для третьего варианта.

Суммарная полная мощность нагрузок ПС «Кабун-1» с учетом вар.3 вычисляется по выражению

$$\begin{aligned} S_{\text{сумм.Каб.вар.3}} &= S_{\text{ком-быт.вар.3}} + S_{\text{сок.вар.3}} + S_{\text{мех.вар.3}} + S_{\text{сумм.апп.фаб.вар.3}}; \\ S_{\text{сумм.апп.фаб.вар.3}} &= S_{\text{ткац.вар.3}} + S_{\text{пряд.вар.3}} + S_{\text{проч.вар.3}}, \end{aligned} \quad (23)$$

где $S_{\text{ком-быт.вар.3}}$ – полная мощность нагрузок трансформаторов 33/11 кВ коммунально-бытовых потребителей для третьего варианта; $S_{\text{сок.вар.3}}$ – полная мощность нагрузок трансформаторов 33/11 кВ Завода соков для третьего варианта; $S_{\text{мех.вар.3}}$ – полная мощность нагрузок трансформаторов 33/11 кВ Механической мастерской для третьего варианта; $S_{\text{сумм.апп.фаб.вар.3}}$ – суммарная аппроксимированная полная мощность нагрузок трансформаторов 11/0,4 кВ Пряд-ткац. фабрики для третьего варианта.

С помощью (22) рассчитаны параметры полной мощности нагрузок – результаты расчетов представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Статистические параметры фактических графиков нагрузок трансформаторов 33/11 кВ ПС «Кабун-1» – исходный, вариант 2 и вариант 3

| Параметр | Ком-быт. | Мех. мастерская | Завод соков | Пряд-ткац. | «Кабун-1» Вар.2 | «Кабун-1» Вар.3 | Исходный с КУ |
|-------------------------|----------|-----------------|-------------|------------|-----------------|-----------------|---------------|
| $S_{\text{сред}}$, МВА | 13,05 | 0,46 | 0,90 | 14,51 | 28,85 | 28,92 | 29,12 |
| $S_{\text{макс}}$, МВА | 21,60 | 1,10 | 1,80 | 15,96 | 37,47 | 36,25 | 42 |
| $K_{\text{эп}}$ | 0,61 | 0,42 | 0,50 | 0,91 | 0,77 | 0,80 | 0,69 |
| $S_{\text{эфф}}$, МВА | 14,12 | 0,64 | 1,06 | 14,54 | 29,46 | 29,33 | 30,60 |
| σ_s , МВА | 5,39 | 0,45 | 0,57 | 0,99 | 5,62 | 4,89 | 9,32 |
| γ_s | 0,41 | 0,98 | 0,63 | 0,07 | 0,19 | 0,17 | 0,32 |

Таблица 6 показывает, что в вар.3 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 1,22 МВА (37,47 – 36,25). При этом во всех вариантах среднее значение мощности нагрузок трансформаторов напряжением 33/11 кВ ПС «Кабун-1» постоянно и равно 29 МВА.

Коэффициент загрузки трансформаторов – вар.3 для первого часа

$$(K_{зг.вар.3})_{t=1ч} = \frac{(S_{сумм.Каб.вар.3})_{t=1}}{S_{ном}} = 0,61 . \quad (24)$$

Относительный срок службы трансформаторов – вар.3 для первого часа

$$(T_{с.сл.вар.3}^*)_{t=1ч} = -1,46(K_{зг.вар.3})_{t=1ч}^2 - 0,5(K_{зг.вар.3})_{t=1ч} + 1,83 = 1,42 . \quad (25)$$

Температуры нагрева обмоток трансформаторов – вар.3 для первого часа

$$(t_{обм.вар.3})_{t=1ч} = \frac{11,79 - (T_{с.сл.вар.3}^*)_{t=1ч}}{0,125} = 81,66 \text{ } ^\circ\text{C} . \quad (26)$$

По результатам расчета, для каждого часа суток ($t=2ч, 3ч \dots 24ч$), на рисунке 10 показаны зависимости коэффициента загрузки, относительного срока службы и температуры нагрева обмотки трансформаторов 33/11 кВ – вар.2 и вар.3.

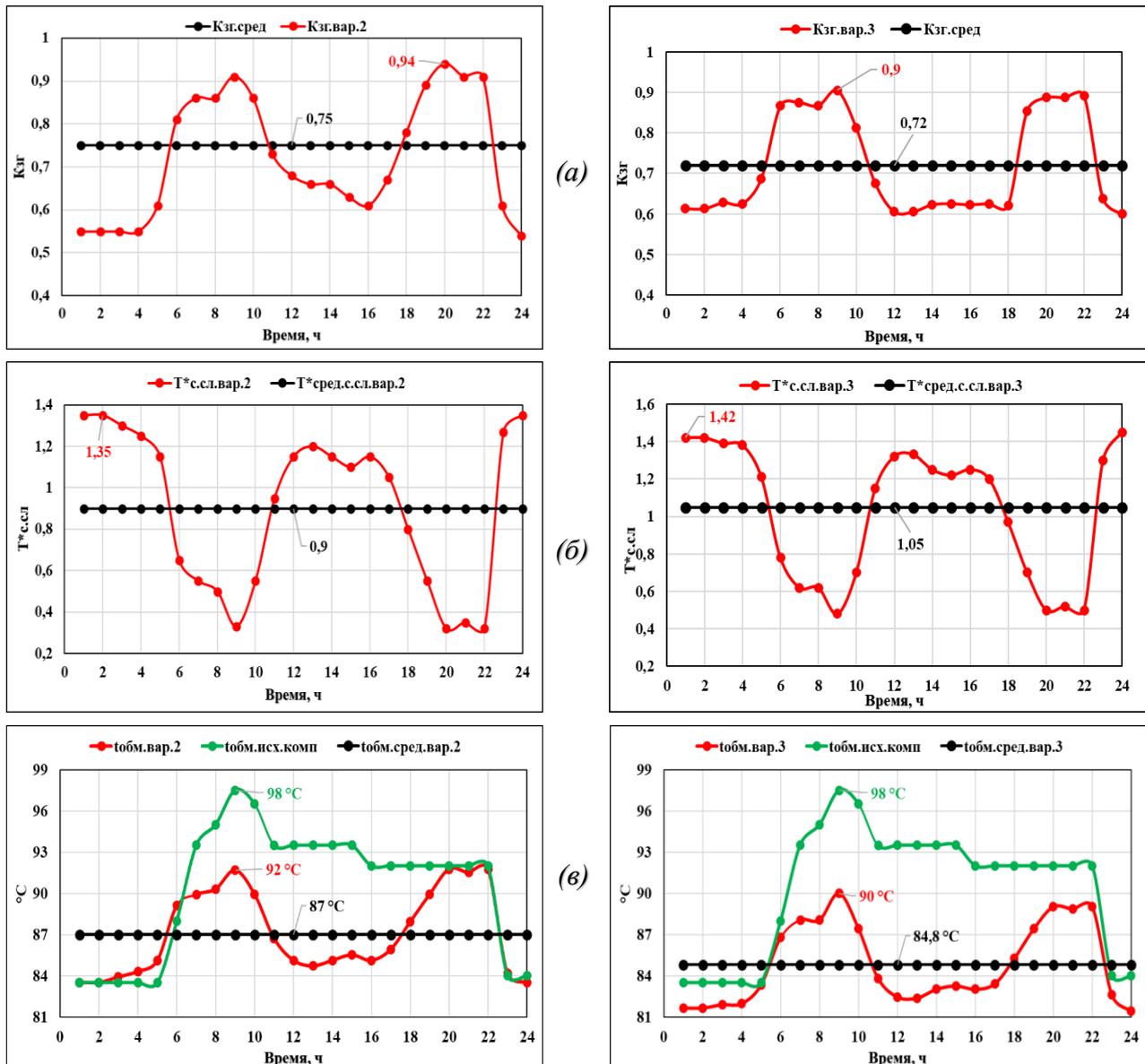


Рисунок 10 – Графические зависимости:

а) коэффициента загрузки, б) относительного срока службы; в) температуры нагрева обмотки

Для различных вариантов графиков нагрузок, значения температуры нагрева обмоток и срока службы трансформаторов ПС «Кабун-1» показаны в таблице 7.

Таблица 7 – Значения температуры нагрева обмоток и срока службы трансформаторов ПС «Кабун-1» для различных вариантов графиков нагрузок

| Основные режимы электропотребления нагрузками | $K_{зг.сред}$ | $t_{обм.сред}$ | $t_{обм.макс}$ | $T_{с.сл}^*$ |
|---|---------------|----------------|----------------|--------------|
| Без учета КУ | 0,8 | 92 °С | 103 °С | 0,5 |
| С учётом КУ | 0,75 | 90 °С | 98 °С | 0,63 |
| Вар.2 | 0,75 | 87 °С | 92 °С | 0,9 |
| Вар.3 | 0,72 | 84,8 °С | 90 °С | 1,05 |

Таблица 7 показывает, что $T_{с.сл.вар.3}^*$ существенно увеличивается на 67 % по сравнению с исходным (таблица 1) с учётом КУ (0,63→1,05), при этом $t_{обм.вар.3}$ уменьшается на 5,2 °С (90→84,8) °С.

По результатам технико-экономического обоснования установлено (таблица 8), 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.

Таблица 8 – Экономия за счет увеличения срока службы двух трансформаторов (с учетом КУ; вариант 2; вариант 3) за 5 лет

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

где $I_{инф}$ – средний индекс инфляции доллара; \mathcal{E} – экономия в год; B – сумма инфляции к получаемой экономии в год; D – экономия в год с учетом инфляции.

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 °С до 90 °С, 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 $T_1^{[1]}=24$ 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.).

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных изданиях, определенных ВАК РФ

1. 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.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

Прочие публикации по теме исследования

5. **Alzakkar A.** An Analytical Study of the Electrical Power Consumption in the Industrial City (Adra – Syria) / **A. Alzakkar**, E. Gracheva, Y. Samofalov // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – 2023. – P. 410-415. – DOI 10.1109/ICIEAM57311.2023.10139241.

6. **Alzakkar A.** The Impact of Cooling Medium Temperatures on the Nominal Power Selection at Substation Transformers (Kabun-1, Syria) / **A. Alzakkar**, E. Gracheva, N. Mestnikov // International Russian Automation Conference (RusAutoCon). – 2023. – P. 42-47. – DOI 10.1109/RusAutoCon58002.2023.10272757.

7. **Альзаккар А.** Моделирование структуры внутривозводской электрической сети пряядильно-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: Казанский государственный энергетический университет, 2023. – С. 138-142.

8. **Альзаккар А.** Экономическая эффективность регулирования потребления электроэнергии / **А. Альзаккар**, Е. И. Грачева // Энергетика будущего - цифровая трансформация: Сборник трудов III всероссийской научно-практической конференции, Липецк: Липецкий государственный технический университет, 2022. – С. 198-202.

9. **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. – DOI 10.34031/ES.2022.2.001.

10. **Альзаккар А.** Моделирование параметров режима электрической сети и системы электроснабжения пряядильно-ткацкой фабрики (г. Дамаск, Сирия) / **А. Альзаккар** // Энергетика и энергосбережение: теория и практика : Сборник Материалов VII Международной Научно-Практической Конференции, Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2023. – С. 305-1-305-7.

11. **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. Под общей редакцией Э.Ю. Абдуллазянова. Том 1. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2023. – С. 165-168.

12. **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, Том 1. – Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2023. – С. 30-32.

13. **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, Vol. Часть 14. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2023. – Р. 16-21.

14. **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.

Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве, заключается в следующем:

[1-4] – проведение экспериментальных исследований, обработка и анализ полученных результатов, формирование выводов;

[5-14] – обработка, описание и визуализация данных, формулирование выводов.

Подписано в печать 09.07.2024. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 1,5. Тираж 100. Заказ № 0907/1.

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии «Вестфалика» (ИП Колесов В.Н.)
420111, г. Казань, ул. Московская, 22. Тел.: 292-98-92
e-mail: westfalika@inbox.ru
