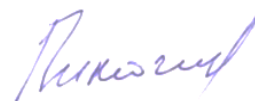


Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Сибирский федеральный университет»

На правах рукописи



Пилюгин Геннадий Александрович

**ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ  
ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ  
ПОТЕРЬ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В СИСТЕМАХ  
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

Специальность 2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание ученой  
степени кандидата технических наук

Научный руководитель:  
Доктор технических наук, профессор  
Пантелеев Василий Иванович

Красноярск - 2024

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>5</b>
<b>1. ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВ ПРИМЕНЕНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ КАК АКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В СОСТАВЕ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ .....</b>	<b>13</b>
1.1. Использование высоковольтных синхронных двигателей в качестве источников реактивной мощности на промышленных предприятиях.....	13
1.2. Анализ методик расчета потерь активной мощности в высоковольтном синхронном двигателе .....	22
1.3. Высоковольтный синхронный двигатель как активный элемент в составе системы электроснабжения промышленного предприятия с активно-адаптивными свойствами .....	42
Выводы по главе 1.....	45
<b>2. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ КАК АКТИВНОГО ЭЛЕМЕНТА .....</b>	<b>47</b>
2.1. Методика и алгоритм оценки состояния высоковольтного синхронного двигателя.....	50
2.2. Программа оценки состояния высоковольтного синхронного двигателя ....	59
2.3. Исследование состояний высоковольтного синхронного двигателя .....	64
Выводы по главе 2.....	71
<b>3. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ УРОВНЯ ПОТЕРЬ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ .....</b>	<b>72</b>
3.1. Обобщенная структура системы электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами .....	72
3.2. Математическая модель обобщенной системы электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами.....	75
3.3. Алгоритм для решения задачи оценки уровня потерь активной мощности.	82
Выводы по главе 3.....	94

<b>4. РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ УРОВНЯ ПОТЕРЬ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ .....</b>	<b>95</b>
4.1. Программа для оценки уровня потерь активной мощности в системе электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами .....	95
4.2. Моделирование режимов работы системы электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами.....	98
4.2.1. Режим компенсации реактивной мощности активных элементов .....	98
4.2.2. Режим потребления реактивной мощности из сети активных элементов .....	102
4.3. Анализ уровня потерь активной мощности в системе электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами.....	104
Выводы по главе 4.....	112
<b>ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ.....</b>	<b>113</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>115</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А. Условно-постоянная информация о высоковольтном синхронном двигателе .....</b>	<b>127</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б. План полного факторного эксперимента и результаты вычислительного эксперимента для высоковольтного синхронного двигателя.....</b>	<b>129</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ В. Условно-постоянная информация об элементах системы электроснабжения .....</b>	<b>133</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Г. План полного факторного эксперимента и результаты вычислительного эксперимента для системы электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами .....</b>	<b>134</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Оценка состояния синхронного двигателя».....</b>	<b>135</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Е. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа определения уровня потерь активной</b>	

<b>мощности в системе электроснабжения промышленного предприятия с синхронными двигателями» .....</b>	<b>136</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Ж. Акт об использовании результатов диссертационной работы.....</b>	<b>137</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ И. Акт об использовании результатов диссертационной работы в учебном процессе .....</b>	<b>138</b>

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы** заключается в необходимости обоснования использования высоковольтных синхронных двигателей для снижения потерь активной мощности в системах электроснабжения промышленных предприятий. Эффективность работы промышленных предприятий определяется во многом экономичностью функционирования систем электроснабжения, которая важна при существенных удельных расходах электроэнергии и высокой энергетической составляющей в структуре себестоимости продукции [91]. Значимой характеристикой расхода электроэнергии являются потери активной мощности в системе электроснабжения. Резервом повышения эффективности работы систем электроснабжения промышленных предприятий является более обоснованный учёт фактических значений потерь активной мощности в элементах, который необходим для достоверности балансовых расчётов электроэнергии и для выбора мероприятий и рекомендаций по снижению потерь активной мощности [45].

Отличительной особенностью ряда промышленных предприятий, а именно, обогатительных фабрик и заводов цветной металлургии, является значительная доля установленной мощности высоковольтных синхронных двигателей (ВСД), которая составляет от 30 до 60 %. ВСД на промышленных предприятиях могут быть использованы как источники реактивной мощности [2, 13, 19, 35, 73], и при этом, может быть достигнута полная компенсация реактивной мощности на шинах главных понизительных подстанций [42].

Согласно [67, 77] ВСД – это активный элемент, под которым подразумевается управляемое устройство компенсации реактивной мощности, применимое для минимизации потерь активной мощности в системе электроснабжения. Из этого можно заключить, что ВСД следует рассматривать не только как электроприемник [35, 40, 60, 73, 75, 80, 84, 88], но и как элемент, участвующий в управлении функционированием системы электроснабжения, а также следует учитывать потери активной мощности двигателя в общей структуре потерь активной мощности системы электроснабжения.

Обеспечить управление режимом реактивной мощности ВСД можно за счет изменения управляющих воздействий, а именно, тока возбуждения и напряжения питания обмоток статора. Такие управляющие воздействия изменяют состояния ВСД, вследствие чего будет изменяться как реактивная, так и активная мощности, потребляемые из сети, и потери активной мощности. В этой связи ВСД следует рассматривать, как активный элемент в составе системы электроснабжения промышленного предприятия, что предопределяет необходимость в непрерывной оценке его состояния при изменении управляющих воздействий.

Активные элементы позволяют обеспечить необходимые активно-адаптивные свойства системе электроснабжения промышленного предприятия. К одному из таких свойств можно отнести адаптивную реакцию на различные отклонения параметров режима в реальном времени, например поддержание требуемого уровня потерь активной мощности в системе электроснабжения [20, 47, 48].

Определению потерь активной мощности в ВСД при различных управляющих воздействиях, посвящены работы Л.В. Литвака, И.А. Сыромятникова, И.А. Никулина, В.А. Трошина, Ю.М. Тюханова, М.В. Грейсуха, П.П. Вершинина, Б.А. Константинова, Э.Г. Куренного, В.В. Архипенко, В.И. Пантелеева, А.Н. Филатова и других ученых [3, 11, 18, 27, 44, 51, 53, 64, 83, 90]. Результаты их исследований можно разделить на полученные с использованием теоретических математических моделей (теоретический подход) и экспериментальных математических моделей (экспериментальный подход).

На основе анализа работ, посвященных использованию ВСД как источников реактивной мощности, а также определению потерь активной мощности в ВСД, отмечая значительные научные результаты, полученные авторами упомянутых работ, можно сделать следующие выводы.

1. Промышленные предприятия со значительной установленной мощностью ВСД обладают высоким потенциалом энергосбережения и повышения энергоэффективности за счет использования компенсирующей способности этих двигателей. Эффективность их использования, по сравнению с другими

устройствами, определяется капитальными затратами, эксплуатационными издержками и потерями активной мощности, расходуемыми на компенсацию. Основным преимуществом ВСД являются незначительные капитальные затраты на 1 квар установленной мощности, так как их установка и эксплуатация обусловлена реализуемыми технологическими процессами предприятий.

2. Анализ существующих методик определения потерь активной мощности в ВСД показал, что известные теоретические и экспериментальные подходы обладают существенными недостатками. Теоретические подходы являются достаточно универсальными и простыми, но обладают высокой погрешностью, а экспериментальные – трудоемки, либо вообще нереализуемы. Высокая погрешность теоретических методик объясняется отличием исходных данных, используемых в расчете, от реальных и их нестабильностью в процессе эксплуатации для однотипных двигателей, которые могут достигать 23%.

3. Для определения потерь активной мощности в ВСД в наибольшей мере подходит метод предложенный [11], в котором учитывается явнополюсность ротора; изменение насыщения магнитной цепи; нагрузку на валу двигателя; изменение напряжения обмоток статора; изменение температуры обмоток и изменение потерь активной мощности в стали магнитопровода. Однако, применение этого метод характеризуется тем, что при определении потерь активной мощности в ВСД отсутствует возможность учитывать зависимости параметров режима от управляющих воздействий, так как определение потерь активной мощности осуществляется при заданном режиме. Это обстоятельство накладывает ограничение на использование данного метода при рассмотрении ВСД в составе системы электроснабжения промышленного предприятий в качестве активного элемента.

Таким образом, актуальной научной задачей энергосбережения и повышения энергетической эффективности систем электроснабжения промышленных предприятий является адекватная оценка возможности использования высоковольтных синхронных двигателей для снижения потерь активной мощности.

**Объект исследования.** Система электроснабжения промышленного предприятия со значительной установленной мощностью ВСД.

**Предмет исследования.** Методика оценки состояния ВСД, как активного элемента системы электроснабжения промышленного предприятия.

**Целью** настоящей диссертационной работы является разработка математического, методического и программного обеспечения, позволяющего повысить эффективность использования высоковольтных синхронных двигателей для снижения потерь активной мощности в системах электроснабжения промышленных предприятий.

**В рамках сформулированной цели в диссертационной работе решаются следующие задачи:**

1. Выполнить сравнительный анализ существующих методик определения потерь активной мощности в ВСД, используемых для компенсации реактивной мощности в системе электроснабжения промышленного предприятия.

2. Разработать методику и программное обеспечение оценки состояния ВСД, как активного элемента в составе системы электроснабжения промышленного предприятия.

3. Разработать математическую модель обобщенной системы электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами, состоящей из линии электропередачи (система внешнего электроснабжения), силового трансформатора с РПН, токопроводов, групп высоковольтных синхронных двигателей и комплексной нагрузки, ориентированную на адекватную оценку уровня потерь активной мощности при различных управляющих воздействиях.

4. Разработать программное обеспечение для оценки уровня потерь активной мощности в системе электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами, с использованием которого произвести моделирование режимов работы и последующий анализ полученных результатов.



**Научная новизна:**

1. Впервые разработана методика оценки состояния ВСД, как активного элемента системы электроснабжения промышленного предприятия, основанная на методе определения потерь активной мощности в синхронном двигателе, учитывающем явнополюсность ротора, изменение насыщения магнитной цепи, нагрузку на валу двигателя, изменения напряжения обмоток статора, температуры обмоток и потерь активной мощности в стали магнитопровода.

2. Создана математическая модель обобщенной системы электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами, позволяющая адекватно оценить потери активной мощности в элементах системы электроснабжения.

3. Предложен алгоритм оценки уровня потерь активной мощности в системе электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами, позволяющий моделировать параметры режима работы и определять потери активной мощности в элементах системы электроснабжения при различных управляющих воздействиях.

**Теоретическая значимость работы** заключается в том, что полученные результаты исследований совершенствуют методические подходы к оценке уровня потерь активной мощности в системе электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами.

**Практическая значимость работы:**

1. Разработанная методика оценки состояния ВСД, как активного элемента в составе системы электроснабжения промышленного предприятия, может быть использована для различных типов ВСД.

2. Разработанный алгоритм, и на его основе программа «Оценка состояния синхронного двигателя» (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021680084 от 07.12.2021), могут быть использованы специалистами промышленных предприятий с высокой долей установленной мощности ВСД в качестве основы для решения задач компенсации реактивной мощности, регулирования напряжения в узлах системы электроснабжения, оценки

уровня потерь активной мощности, оптимизации и других, а также, в системах АСУ ТП.

3. Разработана программа определения уровня потерь активной мощности в системе электроснабжения промышленного предприятия с синхронными двигателями (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022680603 от 03.11.2022), которая была использована для моделирования режимов работы обобщенной системы электроснабжения промышленного предприятия, с заданным количеством активных элементов, анализ полученных результатов которых показал, что потери активной мощности в элементах системы электроснабжения и активных элементах, существенно зависят от управляющих воздействий, и существуют возможности их снижения для повышения энергетической эффективности функционирования предприятия.

**Методы исследования.** В работе используются методы теории электрических цепей, теории электрических машин, систем электроснабжения, методы математического моделирования, итерационные методы и методы планирования эксперимента.

**Тезисы, выносимые на защиту:**

1. Методика оценки состояния ВСД, как активного элемента в составе системы электроснабжения промышленного предприятия, учитывает явнополюсность ротора, изменение насыщения магнитной цепи, нагрузку на валу двигателя, изменения напряжения обмоток статора, температуры обмоток и потерь активной мощности в стали магнитопровода, что позволяет рассматривать различные типы ВСД.

2. Математическая модель обобщенной системы электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами, позволяющая адекватно оценить потери активной мощности в элементах системы электроснабжения.

3. Алгоритм оценки уровня потерь активной мощности в системе электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами, позволяет моделировать параметры режима работы и определять потери активной

мощности в элементах системы электроснабжения при различных управляющих воздействиях.

**Личный вклад автора** заключается в проведении исследований, разработке методики, выборе методологической и информационной базы, разработке программного обеспечения.

**Соответствие диссертации паспорту специальностей.** Сведения, содержащиеся в диссертационной работе, соответствуют следующим пунктам Паспорта научной специальности 2.4.2. «Электротехнические комплексы и системы»:

- пункт 1. Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, анализ системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем, включая электромеханические, электромагнитные преобразователи энергии и электрические аппараты, системы электропривода, электроснабжения и электрооборудования.

- пункт 4. Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов, систем и их компонентов в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях, диагностика электротехнических комплексов.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на V международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности» в г. Чебоксары в 2021 году, всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири» в г. Иркутск в 2023 году и XIX международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы – 2023» в г. Красноярск в 2023 году.

**Публикации.** По результатам выполненных в работе исследований опубликовано 7 печатных работ, в том числе 2 статьи в рецензируемых изданиях,

рекомендованных ВАК РФ, 3 публикации в прочих изданиях и 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Объем и структура диссертации.** Диссертация изложена на 138 страницах машинописного текста и включает введение, четыре главы, основные результаты работы, библиографический список из 101 наименования и 8 приложений. Работа проиллюстрирована 28 рисунками, 3 таблицами. Приложения занимают 12 страниц.

# **1. ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВ ПРИМЕНЕНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ КАК АКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В СОСТАВЕ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

## **1.1. Использование высоковольтных синхронных двигателей в качестве источников реактивной мощности на промышленных предприятиях**

Как правило, электрические нагрузки промышленных предприятий имеют активно-индуктивный характер. Это связано с наличием определенного количества асинхронных двигателей, силовых трансформаторов, длинных кабелей передачи мощности. Таким образом, для предотвращения чрезмерной нагрузки на трансформаторы сети, кабельные трассы, коммутационные устройства и снижения потерь активной мощности требуются установки компенсации реактивной мощности (УКРМ).

Современное состояние энергосистем, в том числе систем электроснабжения промышленных предприятий, в нашей стране и за рубежом характеризуются различными показателями оснащенности устройствами компенсации реактивной мощности (УКРМ). В частности, в США и Японии мощность УКРМ составляет около 70% от активной пиковой мощности. В отдельных энергокомпаниях США мощность установленных УКРМ уже составляет 100% от мощности генераторов. При этом во многих странах наблюдается тенденция уменьшения выдачи генераторами электростанций реактивной мощности за счет увеличения доли, вырабатываемой УКРМ [22].

Повышенный интерес за рубежом уделяется не только использованию достаточного количества УКРМ, но и автоматизации систем регулирования напряжения, управления потоками реактивной мощности, уровнями потерь активной мощности и электроэнергии [22]. Широко известен опыт, реализованный во Франции и Италии, по внедрению автоматизированных

трехконтурных систем, основанных на разделении энергосистем этих стран на зоны управления [26].

В нашей стране с 30-х годов прошлого века и до 2000 г. взаимоотношения энергоснабжающих организаций и потребителей электроэнергии в части реактивной мощности регулировались скидками (надбавками) к тарифам на электроэнергию [36]. Главгосэнергонадзором велся ежегодный учет и анализ уровня компенсации реактивной мощности по предприятиям, союзным республикам, энергообъединениям и стране в целом. Уровень компенсации определялся как отношение суммарной установленной мощности конденсаторных батарей, синхронных компенсаторов и 30% мощности высоковольтных синхронных двигателей (ВСД) к максимальной активной нагрузке предприятия, региона и страны в целом [22].

Судя по результатам проведенных в 2011-2012 гг. энергетических обследований систем электроснабжения, по результатам исследований АО «НТЦ ФСК ЕЭС» [22], ситуация с уровнем компенсации реактивной мощности в последние годы существенно не изменилась, а кое-где ухудшилась. К сожалению, в настоящее время отсутствует полная и достоверная информация о фактической степени компенсации реактивной мощности по стране в целом, по отраслям промышленности, отдельным регионам и уровням напряжения электрических сетей. Но и имеющаяся на сегодня ограниченная информация свидетельствует о значительных проблемах, которые требуют безотлагательного решения.

Создавшийся в настоящее время дефицит установленных УКРМ усугубляется тем, что почти повсеместно наблюдается опережающий рост потребления реактивной мощности по сравнению с активной [22, 50].

Наращивание установленной мощности УКРМ в системах электроснабжения осуществляется главным образом за счет установки батарей статических конденсаторов (БСК), что требует существенных капитальных вложений. Однако в условиях промышленных предприятий, практически, кроме БСК, источниками реактивной мощности являются ВСД [2, 13, 19, 35, 73]. Например, на предприятиях нефтепроводного транспорта, обогатительных

фабриках и комбинатах горной промышленности, как правило, при использовании ВСД в качестве источников реактивной мощности может быть достигнута полная компенсация реактивной мощности на шинах главных понизительных подстанций (ГПП) [42].

На некоторых предприятиях вместо статических УКРМ (или в дополнение к ним) используются электрические машины - синхронные компенсаторы (СК) [30]. С точки зрения конструкции компенсатор представляет собой ВСД, функционирующий в двигательном режиме, но при этом не имеющий нагрузки, иными словами – используемый только как генератор реактивной энергии. СК, устанавливаемые на питающих подстанциях, часто называют генераторами.

Таким образом, СК не выполняют механической работы, их задача – компенсация реактивной мощности, потребляемой другими электроприемниками. Работают они в двух режимах – перевозбуждённом или недовозбуждённом.

В отличие от СК ВСД, работающие на предприятии, могут выполнять двойную функцию – и как собственно двигатели электроприводов технологического оборудования, и как устройства, компенсирующие реактивную мощность, потребляемую другими электроприемниками. Для того, чтобы такая компенсация происходила, необходимо регулировать сдвиг по фазе между потребляемым током ВСД и напряжением достаточно точно, в широких пределах и достаточно быстро в зависимости от характера и величины потребляемой мощности, что является достаточно сложной задачей [58, 93, 96].

В настоящее время СК сами по себе не являются наилучшим способом коррекции коэффициента мощности, статические УКРМ гораздо эффективнее, меньше подвержены износу, требуют меньшего обслуживания. Однако на рассматриваемых в данной работе предприятиях имеются ВСД, которые при определенном характере управления могут одновременно использоваться как компенсаторы реактивной мощности. Это позволяет сделать общий коэффициент мощности предприятия близким к 1, и таким образом снижать потери активной мощности [8, 25].

Реактивная мощность применяемых в промышленности ВСД используется в настоящее время неэффективно. На многих промышленных предприятиях ВСД работают со средней реактивной загрузкой, не превышающей 30-50 % от располагаемой номинальной мощности. Из 200 обследованных ВСД мощностью 0,6-20 МВт только на нескольких машинах были установлены номинальные токи возбуждения, хотя активная нагрузка подавляющего большинства двигателей ниже номинальной [18]. В качестве примера в таблице 1.1 приведены номинальные и фактические режимы реактивной мощности некоторых наиболее крупных двигателей Дмитровского металлургического завода [18].

Неэффективное использование реактивной мощности ВСД определяется, в основном, причинами методического и организационно-технического характера.

К причинам методического характера относится отсутствие у энергетиков промышленных предприятий и проектировщиков инженерных методик технико-экономических расчетов режимов возбуждения двигателей, оптимальных с точки зрения потерь активной мощности. В производственных условиях ВСД практически всегда работают в режимах, отличных от номинальных. Напряжение на зажимах обмоток двигателя, как правило, отличается от номинального значения [18], механическая нагрузка двигателей непостоянна, тепловой режим двигателей зачастую отличается от расчетного. Все перечисленные факторы в процессе эксплуатации изменяются. В этих условиях персонал устанавливает токи возбуждения ниже номинальных значений во избежание перегрева двигателей. Инструкции по выбору технически и экономически обоснованных режимов возбуждения ВСД на предприятиях отсутствуют.

Сказанное подтверждается анкетным опросом энергетиков цехов и промышленных предприятий [18]. На вопрос о причинах снижения тока возбуждения ВСД подавляющее большинство электриков сослалось на отсутствие рекомендуемых оптимальных режимов возбуждения и улучшение теплового режима двигателей. На втором месте по количеству ответов указаны: устаревшее оборудование и некачественный ремонт двигателей, на третьем – плохие условия охлаждения двигателей и сложившиеся традиции.



Таблица 1.1 – Номинальный и фактический режимы реактивной мощности ВСД, установленных на Дмитровском металлургическом заводе

Тип двигателя	Цех	Число СД в работе	$P_{\text{ном}}$ , МВт	$n$ , об/мин	$Q_{\text{ном}}$ , Мвар	$I_{2\text{ном}}$ , А	Фактический режим			
							$P/P_{\text{ном}}$	$U/U_{\text{ном}}$	$I_2/I_{2\text{ном}}$	$Q/Q_{\text{ном}}$
ДСП-140/74-4	АФ-1, 2	12	2	1500	1,22	450	0,87	1,05	0,71	0,24
СТМ-4000-2	ККЦ	3	4	3000	2,27	233	0,54	1,05	0,69	0,26
СТМ-12000-2	ККЦ	2	12	3000	6,5	216	0,53	1,05	0,83	0,31
МС-325-9/12	ТЗС	2	4,6	500	3,5	400	0,65	1,06	0,77	0,4
СТМ-3500-2	ДРЗ-7	2	3,5	3000	1,5	284	0,9	1,05	0,56	0,4
СТД-10000-2	ДРЗ-7	2	10	3000	4,3	270	0,9	1,05	0,7	0,23
МС-325-15/12	РБЦ	1	8	1000	6,0	321	1,04	1,05	0,81	0,33
ДС-321-21-16	Бл. 1150	1	11,5	375	8,0	486	1,0	1,06	0,78	0,17
СДН-15-39-6	ДРЗ-5	4	1,6	1000	0,96	265	0,83	1,05	0,9	0,45
СТМ-1500-2	ККЦ	6	1,5	3000	0,86	334	0,64	1,05	0,57	0,48

К причинам организационно-технического характера относится отсутствие действенной системы экономического стимулирования максимального использования реактивной мощности ВСД. Действовавшие до 1984 г. нормативно-технические документы, призванные стимулировать установку дополнительных УКРМ в сетях потребителей электроэнергии [85], не оказали ожидаемого воздействия на эффективность использования ВСД. Задаваемые потребителям значения реактивной мощности, передаваемой из энергосистемы, определялись практически без учета располагаемой мощности ВСД. В директивных документах по компенсации реактивной мощности, введенных в 1984 г., были предусмотрены требования по использованию располагаемой реактивной мощности ВСД [86]. Однако и в них эти требования были недостаточно жесткими. Так, в расчетах величины экономически целесообразной реактивной мощности неиспользованная реактивная мощность ВСД учитывается с коэффициентом 0,7, который вводится для обеспечения гарантированности расчета. Это означает, что при существующей нагрузке ВСД реактивным током около 20 % располагаемой реактивной мощности двигателей в расчетах не учитывается. В документах не предусматривался контроль со стороны энергосистемы за режимом реактивной мощности ВСД. На промышленных предприятиях отсутствовало материальное стимулирование персонала за эффективное использование ВСД для компенсации реактивной нагрузки.

В новых директивных документах по компенсации реактивной мощности, введенных в действие в 1993 г., в основу решения по выбору УКРМ положена минимизация приведенных затрат. Критерии выбора решений не привязаны жестко к текущим значениям цен на электрооборудование, как это имело место в указаниях 1984 г., а представлены в общем виде, позволяющем принимать оптимальные и близкие к ним решения в условиях частого и значительного изменения стоимостных показателей. В качестве УКРМ в сетях общего назначения промышленных предприятий принимаются БСК и ВСД [38, 76].

Отсутствие нормативно-технической документации, определяющей оптимальные режимы работы ВСД по реактивной мощности на действующих

промышленных предприятиях в реальных условиях их эксплуатации, объясняется недостаточным уровнем изученности и освещенности этого вопроса в литературе.

Основные научные положения, связанные с применением ВСД для компенсации реактивной мощности, разработаны в трудах Л.В. Литвака, И.А. Сыромятникова, И.А. Никулина, В.А. Трошина, Ю.М. Тюханова, М.В. Грейсуха, Б.А. Константинова, Э.Г. Куренного, П.П. Вершинина, В.В. Архипенко, А.Н. Филатова и других ученых [3, 11, 18, 27, 44, 51, 53, 64, 83, 90]. Благодаря их работам ВСД нашли широкое применение в промышленности для решения задач компенсации реактивной мощности. Однако, на сегодняшний день практику использования ВСД нельзя признать вполне эффективной по причинам, указанным выше.

Известные подходы в моделировании режимов реактивной мощности ВСД, основанные на построении векторных диаграмм, предполагают идеализированные условия их эксплуатации и не учитывают многообразие влияющих факторов. Кроме того, используемые в них каталожные данные двигателей и фактические параметры характеризуются большим разбросом, а некоторые параметры не проверяются экспериментально ни на заводе-изготовителе, ни в условиях эксплуатации. Не учитывается в расчетах и то обстоятельство, что параметры двигателей изменяются в процессе эксплуатации, особенно после капитального ремонта [6, 55, 63].

В результате погрешность расчетов располагаемой реактивной мощности в ВСД превышает 10-50 % при сравнении с измеренной, а расчет оптимального распределения реактивной нагрузки между несколькими двигателями становится бессмысленным [18]. Естественно, такие подходы не могут удовлетворить требованиям, которые предъявляются при построении математических моделей, в том числе в задачах автоматизированных систем управления электроснабжением [72].

Для повышения точности расчетов разрабатываются математические модели [18], максимально приближенные к реальным условиям эксплуатации двигателя и построенные на основе экспериментально проверенных данных. Так

как ВСД и система электроснабжения представляют собой сложную электротехническую систему, характеризуемую большим количеством параметров, испытание ее отличается особой сложностью и трудоемкостью. В этих условиях максимальную информацию о системе при минимальном числе опытов можно получить, применив методы планирования эксперимента [5, 59]. Наряду с сокращением числа опытов планирование эксперимента позволяет установить аналитическую зависимость между интересующими параметрами, которые рассматриваются как входы и выходы кибернетической системы, то есть создать экспериментально-математическую модель. При этом сложные уравнения, связывающие многообразие конструктивных и режимных параметров электрической машины, системы электроснабжения и отражающие действие физических законов, заменяются простыми алгебраическими выражениями, обычно полиномами первой или второй степени.

Моделирование на этой основе позволяет получить зависимости, связывающие режимные параметры ВСД. Однако, данный подход к моделированию имеет одно существенное ограничение: разработка экспериментальной математической модели ВСД осуществляется для конкретной электрической машины и не может быть использована для других по причинам, описанным выше.

Существенным недостатком известных методик расчета реактивной мощности ВСД является либо высокая погрешность, либо трудоемкость и большое требуемое количество исходных данных.

Наличие у специалистов универсальных и, в то же время, достаточно точных математических моделей ВСД, непосредственно связывающих внешние воздействия на двигатель и его реакцию в виде генерируемой реактивной мощности и потерь активной мощности, позволит прогнозировать режимы ВСД при переменной механической нагрузке, отклонениях напряжения и использовать двигатель как УКРМ с максимальной эффективностью.

Также следует отметить, что при определении реактивной мощности ВСД следует учитывать ограничения мощности по тепловому режиму обмоток ротора

и статора, обусловленные отклонением фактического режима охлаждения двигателя от расчетного и изменениями напряжения в узлах системы электроснабжения [18].

Результаты обследования промышленных установок ВСД и расчеты располагаемой реактивной мощности показывают, что при эффективном использовании двигателей на промышленных предприятиях можно повысить показатель оснащенности УКРМ с 20 % до 28 % без дополнительных капиталовложений, а на большинстве металлургических заводов цветной металлургии путем использования ВСД и генераторов местных электростанций можно полностью компенсировать реактивную мощность потребителей [42].

В настоящее время отсутствует достаточно обоснованная методика технико-экономического сравнения ВСД с другими УКРМ, а также методика оптимального распределения реактивной нагрузки между источниками. В результате на многих промышленных предприятиях при наличии неиспользуемого резерва реактивной мощности ВСД и СГ устанавливается большое количество БСК [62].

Определенный резерв реактивной мощности можно реализовать на стадии проектирования систем электроснабжения промышленных предприятий, использующих ВСД [84, 88]. В настоящее время в проектной практике принято для компенсации реактивной мощности использовать выбранные в электроприводах ВСД и СГ ТЭЦ, а если мощность их недостаточна, предусматривается установка БСК. Расчет режимов реактивной мощности при проектировании систем электроснабжения целесообразно вести одновременно с выбором сечения проводов и жил кабелей, в результате чего можно повысить эффективность использования ВСД и сократить расход БСК.

## 1.2. Анализ методик расчета потерь активной мощности в высоковольтном синхронном двигателе

Эффективное использование ВСД для компенсации реактивных нагрузок в системах электроснабжения промышленных предприятий зависит от правильного определения потерь активной мощности на преобразование активной энергии и выработку реактивной мощности. Преобразование активной энергии сопровождается неизбежными потерями активной мощности, возникающими в обмотках статора и ротора, магнитопроводе. Кроме того, мощность расходуется на покрытие механических потерь, таких, как трение в подшипниках и вентиляция. Выработка реактивной мощности приводит к дополнительным потерям активной мощности на её генерацию, что оказывает существенное влияние на возможность использования ВСД в качестве УКРМ [43].

Потери активной мощности в СД в общем виде могут быть описаны следующей системой уравнений [83]:

$$\Delta p_{\text{СД}} = \begin{cases} P_1 + P_f - P_2 \\ \Delta p_0 + \Delta p_P + \Delta p_Q \end{cases} \quad (1.1)$$

где  $\Delta p_{\text{СД}}$  – потери активной мощности в ВСД, кВт;

$P_1$  – мощность ВСД, потребляемая из электрической сети, кВт;

$P_f$  – мощность, потребляемая обмоткой возбуждения ВСД, кВт;

$P_2$  – механическая мощность на валу ВСД, кВт;

$\Delta p_0$  – потери холостого хода в ВСД (потери в стали и механические), кВт;

$\Delta p_P$  – потери активной мощности, зависящие от активной нагрузки, кВт;

$\Delta p_Q$  – потери активной мощности, зависящие от режима реактивной мощности, кВт;

Первое упоминание о расходе активной мощности на компенсацию в ВСД представлено в работе Л.В. Литвака [53]. Автором были получены аналитические зависимости для определения  $\Delta p_{\text{СД}}$  при номинальном напряжении, номинальном

токе возбуждения и нагрузке на валу меньше номинальной, так как в практических условиях нагрузка ВСД составляет порядка 70-80% номинальной.

Система уравнений баланса потерь активной мощности в ВСД [53]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta p_{\text{сд}} = \Delta p_{\text{а}} + \Delta p_{\text{р}} \\ \Delta p_{\text{а}} = \Delta p_0 + 3 \cdot (\beta \cdot I_{1\text{а.ном}})^2 \cdot r_{\text{ст}} + \\ + c^2 \cdot I_{2\text{.кз}}^2 \cdot r_{\text{воз}} \cdot \left[ \frac{U_{1\text{.ном}}^2}{E_{0\text{.кз}}^2} + \frac{(\beta \cdot I_{1\text{а.ном}})^2 \cdot x_d^2}{E_{0\text{.кз}}^2} \right] \\ \Delta p_{\text{р}} = 3 \cdot (\alpha \cdot I_{1\text{р.ном}})^2 \cdot r_{\text{ст}} + \\ + c^2 \cdot I_{2\text{.кз}}^2 \cdot r_{\text{воз}} \cdot \left[ \frac{2 \cdot U_{1\text{.ном}} \cdot \alpha \cdot I_{1\text{р.ном}} \cdot x_d}{E_{0\text{.кз}}^2} + \frac{(\alpha \cdot I_{1\text{р.ном}})^2 \cdot x_d^2}{E_{0\text{.кз}}^2} \right] \end{array} \right. \quad (1.2)$$

где  $\Delta p_{\text{а}}$  – составляющая потерь активной мощности, которая определяется активной составляющей тока статора, кВт;

$\beta$  – коэффициент активной нагрузки двигателя (на валу), о. е.;

$I_{1\text{а.ном}}$  – активный ток статора при номинальном режиме, А;

$r_{\text{ст}}$  – активное сопротивление фазы статора, Ом;

$c$  – коэффициент, учитывающий насыщение магнитной цепи и зависящий от конструкции двигателя.

$I_{2\text{.кз}}$  – ток возбуждения при опыте короткого замыкания, А;

$r_{\text{воз}}$  – активное сопротивление обмотки возбуждения, Ом;

$U_{1\text{.ном}}$  – номинальное напряжение обмоток статора двигателя, В;

$x_d$  – синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси ВСД, о. е.;

$E_{0\text{.кз}}$  – значение ЭДС, индуцируемой потоком возбуждения ВСД при опыте короткого замыкания, В;

$\Delta p_{\text{р}}$  – составляющая потерь активной мощности, которая определяется реактивной составляющей тока статора. кВт;

$\alpha$  – коэффициент реактивной нагрузки двигателя, о.е.;

$I_{1\text{р.ном}}$  – реактивный ток статора при номинальном режиме, А.

$$\beta = \frac{P_2}{P_{2.\text{НОМ}}}, \quad (1.3)$$

где  $P_2$  – активная мощность нагрузки на валу ВСД, кВт;

$P_{2.\text{НОМ}}$  – номинальная активная мощность на валу ВСД, кВт.

$$\alpha = \frac{Q}{Q_{\text{НОМ}}}. \quad (1.4)$$

где  $Q$  – реактивная мощность ВСД, квар;

$Q_{\text{НОМ}}$  – номинальная реактивная мощность ВСД, квар.

Заменив в выражении (1.2):

$$I_{1р.\text{НОМ}} = I_{1.\text{НОМ}} \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{\text{Н}}}, \quad (1.5)$$

где  $I_{1.\text{НОМ}}$  – полный ток статора при номинальном режиме, А;

$\cos \varphi_{\text{Н}}$  – номинальный коэффициент мощности ВСД, о. е.

$$3 \cdot I_{1.\text{НОМ}}^2 \cdot r_{\text{СТ}} = \Delta p_{\text{СТ.НОМ}}, \quad (1.6)$$

где  $\Delta p_{\text{СТ.НОМ}}$  – номинальные потери активной мощности в обмотках статора ВСД, кВт.

$$\frac{U_{1.\text{НОМ}}}{I_{1.\text{НОМ}} \cdot x_d} = \frac{1}{x_d} \approx 0,85 \cdot \text{ОКЗ}, \quad (1.7)$$

где ОКЗ – отношение короткого замыкания ВСД, о. е.

$$c^2 \cdot I_{2.\text{КЗ}}^2 = \frac{I_{2.\text{НОМ}}^2}{\varepsilon_{\text{КЗ}}}, \quad (1.8)$$



где  $I_{2.ном}$  – номинальный ток возбуждения, А;

$\varepsilon_{кз}$  – относительное значение ЭДС, индуцируемой потоком возбуждения ВСД при опыте короткого замыкания, о. е.

$$\varepsilon_{кз} \approx 1 + 1,7 \cdot ОКЗ \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_H} + 0,72 \cdot ОКЗ, \quad (1.9)$$

$$I_{2.ном}^2 \cdot r_{воз} = \Delta p_{воз.ном}, \quad (1.10)$$

где  $\Delta p_{воз.ном}$  – номинальные потери активной мощности в обмотке возбуждения ВСД, кВт.

$$E_{0.кз} = I_{1.ном} \cdot x_d. \quad (1.11)$$

Подставив (1.5) – (1.11) в (1.2), получим:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta p_a = \Delta p_0 + \Delta p_{ст.ном} \cdot \beta^2 \cdot \cos^2 \varphi_H + \\ + \frac{\Delta p_{воз.ном}}{\varepsilon_{кз}} \cdot [0,72 \cdot ОКЗ^2 + \beta^2 \cdot \cos^2 \varphi_H] \\ \Delta p_p = \Delta p_{ст.ном} \cdot \alpha^2 \cdot (1 - \cos^2 \varphi_H) + \\ + \frac{\Delta p_{воз.ном}}{\varepsilon_{кз}} \cdot [1,7 \cdot \alpha \cdot ОКЗ \cdot \sqrt{(1 - \cos^2 \varphi_H)} + \alpha^2 \cdot (1 - \cos^2 \varphi_H)] \end{array} \right. \quad (1.12)$$

Предложенная методика определения потерь активной мощности в ВСД разработана на основании векторной диаграммы идеализированного ВСД и не учитывает явнополусность ротора, изменений насыщения магнитной цепи, напряжения на зажимах статорной обмотки и тока возбуждения. Величина  $\Delta p_{сд}$  зависит от номинальных активных потерь мощности в обмотках статора и возбуждения, ОКЗ, коэффициентов активной и реактивной нагрузок ВСД. Экспериментальные исследования по определению точности расчетов по приведённым выражениям не проводились.

Основным недостатком данной методики является то, что расчеты производятся при номинальных значениях напряжения и тока возбуждения. В практике эксплуатации ВСД таких условий практически не бывает.

Позднее И.А. Сыромятниковым [83] была предложена методика, направленная на решение задач определения расхода активной мощности на генерацию реактивной. Автором были получены теоретические соотношения для определения потерь активной мощности при режимах работы ВСД, отличающихся от номинального.

Общие потери активной мощности в ВСД при активной нагрузке [83]:

$$\Delta p_{\text{СД}} = \Delta p_0 + \Delta p_{\text{ст.ном}} \cdot \left( \frac{I_1}{I_{1.\text{ном}}} \right)^2 + \Delta p_{\text{воз.ном}} \cdot \left( \frac{I_2}{I_{2.\text{ном}}} \right)^2. \quad (1.13)$$

где  $I_1$  – полный ток статора отличающийся от номинального, А;

$I_2$  – ток возбуждения отличающийся от номинального, А.

Заменив в выражении (1.13):

$$\frac{I_1}{I_{1.\text{ном}}} = \sqrt{\beta_1^2 \cdot \cos^2 \varphi_{\text{н}} + \alpha^2 \cdot (1 - \cos^2 \varphi_{\text{н}})}, \quad (1.14)$$

где  $\beta_1$  – коэффициент активной нагрузки двигателя (мощности, потребляемой из сети), о. е.

$$\beta_1 = \frac{P_1}{P_{1.\text{ном}}}, \quad (1.15)$$

где  $P_1$  – активная мощность ВСД, потребляемая из сети, кВт;

$P_{1.\text{ном}}$  – номинальная активная мощность ВСД, потребляемая из сети, кВт.

$$\frac{I_2}{I_{2.\text{НОМ}}} = k_B = \frac{1}{1 + x_d^2 + 2 \cdot x_d \cdot \sqrt{(1 - \cos^2 \varphi_H)}} + \frac{\beta_1^2 \cdot x_d^2 \cdot \cos^2 \varphi_H}{1 + x_d^2 + 2 \cdot x_d \cdot \sqrt{(1 - \cos^2 \varphi_H)}} + \left(\frac{1 - k_{B1}}{\alpha'}\right)^2 \cdot \alpha^2 + \frac{2 \cdot k_{B1} \cdot (1 - k_{B1})}{\alpha'} \cdot \alpha \quad (1.16)$$

где  $k_B$  – кратность тока возбуждения по отношению к номинальному, о. е.;

$k_{B1}$  – кратность тока возбуждения по отношению к номинальному при режиме  $\alpha = 0$ , о. е.;

$\alpha'$  – относительное значение реактивной мощности при номинальном токе возбуждения и соответствующей активной нагрузке  $\beta_1$ , о. е.;

$$\alpha' = \frac{Q'}{Q_{\text{НОМ}}}, \quad (1.17)$$

где  $Q'$  – реактивная мощность ВСД, при номинальном токе возбуждения и соответствующей активной нагрузке  $P_1$  квар.

Было получено следующее выражение:

$$\Delta p_{\text{СД}} = \left[ \Delta p_0 + \frac{\Delta p_{\text{ВОЗ.НОМ}}}{1 + x_d^2 + 2 \cdot x_d \cdot \sqrt{(1 - \cos^2 \varphi_H)}} \right] + \left[ \frac{\Delta p_{\text{ВОЗ.НОМ}} \cdot x_d^2 \cdot \cos^2 \varphi_H}{1 + x_d^2 + 2 \cdot x_d \cdot \sqrt{(1 - \cos^2 \varphi_H)}} + \Delta P_{\text{СТ.НОМ}} \cdot \cos^2 \varphi_H \right] \cdot \beta_1^2 + \left[ \Delta P_{\text{СТ.НОМ}} \cdot (1 - \cos^2 \varphi_H) + \Delta p_{\text{ВОЗ.НОМ}} \cdot \left(\frac{1 - k_{B1}}{\alpha'}\right)^2 \right] \cdot \alpha^2 + \left[ \frac{2 \cdot \Delta p_{\text{ВОЗ.НОМ}} \cdot k_{B1} \cdot (1 - k_{B1})}{\alpha'} \right] \cdot \alpha \quad (1.18)$$

ИЛИ

$$\Delta p_{сд} = C + D \cdot \beta_1^2 + A \cdot \alpha^2 + B \cdot \alpha, \quad (1.19)$$

где  $C$  – составляющая потерь, не зависящая от активной и реактивной мощностей, кВт;

$D \cdot \beta_1^2$  – составляющая потерь, изменяющаяся пропорционально квадрату  $\beta_1$ , кВт;

$A \cdot \alpha^2$  – составляющая потерь, изменяющаяся пропорционально квадрату  $\alpha$ , кВт;

$B \cdot \alpha$  – составляющая потерь, изменяющаяся пропорционально  $\alpha$ , кВт.

Значения коэффициентов  $A$ ,  $B$ ,  $D$  и составляющая потерь  $C$  определяются на основании векторной диаграммы неявнополюсной синхронной машины с учетом насыщения магнитной цепи по диаграмме Потье [83].

Предложенная методика определения потерь активной мощности в ВСД имеет существенное преимущество по сравнению с методикой предложенной Л.В. Литваком [53], так как в ней учитывается изменение тока возбуждения. Однако в методике также не учитывается явнополюсность двигателя и уровень питающего напряжения. Отсутствует проверка предложенных теоретических соотношений опытным путем.

Методика, предложенная И.А. Сыромятниковым [83], была частично усовершенствована И.А. Никулиным [64]. В предыдущих двух алгоритмах расчета потерь активной мощности в ВСД введена составляющая потерь  $\Delta p_0$ , характеризующая постоянные потери в стали, механические потери на трение и вентиляцию, а также добавочные потери.

Автором была выявлена зависимость потерь в стали магнитопровода двигателя  $\Delta p_c$  от коэффициентов активной  $\beta_1$  и реактивной  $\alpha$  нагрузок, представленная выражением (1.20).

$$\Delta p_c = \Delta p_{c.\text{НОМ}} \cdot \frac{[\alpha^2 \cdot (1 - \cos^2 \varphi_H) + \beta_1^2 \cdot \cos^2 \varphi_H] \cdot x_\sigma^2}{\dot{\epsilon}_{\sigma.\text{НОМ}}^2} + \frac{2 \cdot \alpha \cdot x_\sigma \cdot \sqrt{(1 - \cos^2 \varphi_H) + 1}}{\dot{\epsilon}_{\sigma.\text{НОМ}}^2} \quad (1.20)$$

где  $\Delta p_{c.\text{НОМ}}$  – номинальные потери активной мощности в стали магнитопровода ВСД, кВт;

$x_\sigma$  – индуктивное сопротивление рассеяния ВСД, о. е.;

$\dot{\epsilon}_{\sigma.\text{НОМ}}$  – относительное значение номинальной результирующей ЭДС, о. е.

Погрешность методики после усовершенствования также не анализировалась.

Ранее предпринимались попытки разработки упрощенных методик определения потерь активной мощности в ВСД [27], а также были проведены экспериментальные исследования существующих методик расчета потерь на двигателях мощностью 630 кВт и 2000 кВт [18, 44, 51].

Выводами авторов были:

1. Упрощенные методики определения потерь активной мощности в ВСД можно использовать только для ориентировочной оценки.

2. Исследования показали, что потери, определённые по упрощённым методикам, отличаются от экспериментально полученных на 25-40 %. Авторы рекомендуют использовать методику, предложенную И.А. Сыромятниковым с учетом изменения потерь в стали магнитопровода.

3. При отклонениях напряжения на зажимах статорной обмотки ВСД более 2-3 % от номинального вводились коэффициенты в уравнение (1.19), характеризующие изменения напряжения. Опытным путем это дополнение не проверялось, так как отсутствовала возможность регулирования напряжения.

4. Для повышения точности расчетов целесообразно определять потери активной мощности в ВСД опытным путем.

Анализ работ [18, 53, 64, 83] показал, что оценка погрешности существующих методик определения потерь активной мощности в ВСД,

посредством проведения экспериментальных исследований, практически не осуществлялась, за исключением работы [18], в которой предпринимались попытки этой оценки.

Решением задачи повышения точности определения потерь в ВСД занимался П.П. Вершинин [18]. В своей работе автор представил результаты экспериментальных исследований по множеству эксплуатируемых ВСД различного назначения и мощности.

Исследования подразумевали оценку погрешности определения потерь активной мощности на компенсацию, а именно  $\Delta p_p$  зависящую от  $\alpha$  по методике, предложенной И.А. Сыромятниковым [83]:

$$\Delta p_p = A \cdot \alpha^2 + B \cdot \alpha. \quad (1.21)$$

где  $A$  – коэффициент составляющей потерь, зависящей от квадрата  $\alpha$ , кВт;

$B$  – коэффициент составляющей потерь, зависящей от  $\alpha$ , кВт.

В таблице 2 для иллюстрации проведенных исследований на конкретных ВСД представлены суммы расчетных коэффициентов  $A$  и  $B$ , значения которых определены в [85], и суммы коэффициентов, определенных экспериментально [18], при компенсации номинальной реактивной мощности, то есть  $\alpha = 1$ :

$$\Delta p_p = A + B. \quad (1.22)$$

Приведенные значения в таблице 2 показывают, что потери активной мощности на генерацию  $\Delta p_p$ , при  $\alpha = 1$ , полученные экспериментально и расчетным путем, различаются в пределах от -30 до +28 %, а если учитывать погрешность измерений при экспериментальных исследованиях, то эти отличия могут оказаться больше.

Из вышесказанного можно сделать следующие выводы:

1. Основными причинами расхождения потерь  $\Delta p_p$  являются погрешности расчетов. Несовпадение экспериментальных и расчетных значений объясняется отклонениями в процессе исследований активной нагрузки двигателя, напряжения на зажимах статорной обмотки от номинального, а также не учетом потерь мощности в стали магнитопровода ВСД.

Таблица 2 – Значения сумм коэффициентов  $A$  и  $B$ , полученных экспериментально и расчетным путем

Тип двигателя	$P_{\text{ном}}$ , кВт	$n$ , об/мин	$\Delta p_p = A \cdot \alpha^2 + B \cdot \alpha$ , кВт (при $\alpha = 1$ )		$\delta$ , %
			эксперимент	Расчет	
СДУ-18/54-16-2	3200	375	24,00	29,70	+ 19
СДВ-16-41-12	1250	500	11,30	14,53	+ 22
СЛН-14-46-8	800	750	12,31	9,47	- 30
СДН-14-49-6	1000	1000	11,39	9,08	-25
ДСК 260/24-36	625	167	14,11	16,84	+ 16
СТМ 4000-2	4000	3000	20,00	18,89	- 5
СДН-16-21-24	320	250	12,73	10,00	- 27
СДН-18-39-24	1600	250	28,87	25,00	- 16
ДСК 173/16-16 А	300	375	8,30	9,24	+ 10
СДС 3-18-24-40	500	150	9,00	12,43	+ 28

2. Для повышения точности расчетов необходимо учитывать существующий разброс исходных данных однотипных двигателей, а также их нестабильность в процессе эксплуатации. В [18] автор приводит исследования номинальных потерь в ВСД (СДС-14-59-8), полученных по протоколам заводских испытаний, произведенного в разные годы. Разброс суммарных номинальных потерь активной мощности в нем достигает 23 %, что оказывает существенное влияние на результат вычислений. Это проблема неоднократно выявлялась в процессе испытаний однотипных ВСД в эксплуатируемых электроустановках.

3. Разброс значений коэффициентов  $A$  и  $B$ , определенных расчетным и опытным путем, при определении потерь  $\Delta p_p$  для одноступенчатых двигателей достигает 30%. Таким образом, расчетный метод определения потерь  $\Delta p_p$  через коэффициенты  $A$  и  $B$ , может использоваться только для ориентировочных расчетов.

4. На промышленных предприятиях в большом количестве эксплуатируются ВСД с номинальным напряжением  $U_{1.ном} = 6$  и  $10$  кВ и номинальными коэффициентами мощности  $\cos \varphi_H = 0,8; 0,85; 0,95$  и  $1$ , а также встречаются двигатели с номинальным напряжением  $U_{1.ном} = 3$  кВ. Для множества двигателей отсутствует информация по коэффициентам  $A$  и  $B$ , так как все их значения определены для двигателей с номинальным коэффициентом мощности  $\cos \varphi_H = 0,9$  и номинальным напряжением  $U_{1.ном} = 6$  и  $10$  кВ [85]. Ориентировочно определить коэффициенты  $A$  и  $B$ , для двигателей по которым отсутствует информация, можно по зависимости (1.18), но в каталогах и паспортах, выданных заводами-изготовителями, не всегда отображаются необходимые данные, например, номинальные потери активной мощности в обмотках статора и возбуждения.

5. Точность определения потерь активной мощности  $\Delta p_p$  через коэффициенты  $A$  и  $B$ , опытным путем, используя методики планирования эксперимента [5, 59], будет всегда выше по сравнению с расчетными методами, однако такой подход на действующих электроустановках с ВСД может быть практически нереализуемым, за исключением новых машин, исследования которых можно произвести на заводах-изготовителях. Также, экспериментально найденные значения коэффициентов  $A$  и  $B$  действительны только при напряжении на зажимах статорной обмотки двигателя равном тому, при котором осуществлялись исследования.

6. Экспериментальный метод определения  $\Delta p_p$  путем прямого измерения мощности, потребляемой ВСД при компенсации, кажется достаточно простым, но практически является нереализуемым, по причине погрешности измерений.



Причина состоит в следующем: величина коэффициентов  $A$  и  $B$ , используемых при определении  $\Delta p_p$ , по сравнению с измеряемой активной мощностью достаточно мала, вследствие чего погрешность измерений может превысить их значения.

В работах В.В. Архипенко [11] отмечается, что при практическом решении задач оптимального распределения и регулирования реактивной мощности в системе электроснабжения промышленного предприятия возникает потребность в точном определении потерь активной мощности в ВСД в зависимости от режима его работы с учетом изменения температуры обмоток, явнополюсности ротора и насыщения магнитной цепи.

Суммарные потери активной мощности в ВСД [11]:

$$\Delta p_{\text{СД}} = \Delta p_0 + \Delta p_{*1.\text{НОМ}} \cdot \Delta p_{1.\text{НОМ}} + \Delta p_{*2.\text{НОМ}} \cdot \Delta p_{2.\text{НОМ}} + \Delta p_{*3.\text{НОМ}} \cdot \Delta p_{3.\text{НОМ}}, \quad (1.23)$$

где  $\Delta p_0$  – механические потери в СД, кВт;

$\Delta p_{1.\text{НОМ}}$  – номинальные потери активной мощности в обмотках статора ВСД, кВт.

$\Delta p_{*1.\text{НОМ}}$  – значение потерь активной мощности в обмотке статора ВСД по отношению к номинальному, о. е.;

$\Delta p_{2.\text{НОМ}}$  – номинальные потери активной мощности в обмотке возбуждения ВСД, кВт;

$\Delta p_{*2.\text{НОМ}}$  – значение потерь активной мощности в обмотке возбуждения ВСД, по отношению к номинальному о. е.;

$\Delta p_{3.\text{НОМ}}$  – номинальные потери активной мощности в стали магнитопровода ВСД, кВт;

$\Delta p_{*3.\text{НОМ}}$  – значение потерь активной мощности в стали магнитопровода ВСД по отношению к номинальному, о. е.

$$\Delta p_{*1.\text{НОМ}} = \frac{\Delta p_1}{\Delta p_{1.\text{НОМ}}} = \frac{r_1 \cdot I_1^2}{r_{1.\text{НОМ}} \cdot I_{1.\text{НОМ}}^2} = r_{*1} \cdot I_{*1}^2, \quad (1.24)$$

где  $\Delta p_1$  – потери активной мощности в обмотке статора ВСД в зависимости от режима его работы, кВт;

$r_1$  – активное сопротивление фазы статора, Ом;

$r_{1.\text{ном}}$  – активное сопротивление фазы статора при температуре, соответствующей номинальному режиму работы двигателя, Ом;

$r_{*1}$  – относительное по отношению к номинальному значению активного сопротивления фазы статора, о. е.;

$I_{*1}$  – относительное по отношению к номинальному значению тока статора, о. е.

Учет температуры обмоток статора и возбуждения представлен уравнениями (1.25) и (1.27) [11].

$$r_{*1} = \frac{235 + \nu_0 + \tau_{1\text{н}} \cdot I_{*1}^2}{235 + \nu_0 + \tau_{1\text{н}}} \quad (1.25)$$

где  $\nu_0$  – температура охлаждающей среды, °С;

$\tau_{1\text{н}}$  – номинальное значение превышения температуры обмотки статора над температурой охлаждающей среды ВСД, °С.

$$\Delta p_{*2.\text{ном}} = \frac{\Delta p_2}{\Delta p_{2.\text{ном}}} = \frac{r_2 \cdot I_2^2}{r_{2.\text{ном}} \cdot I_{2.\text{ном}}^2} = r_{*2} \cdot I_{*2}^2, \quad (1.26)$$

где  $\Delta p_2$  – потери активной мощности в обмотке возбуждения ВСД, кВт;

$r_2$  – активное сопротивление обмотки возбуждения, Ом;

$r_{2.\text{ном}}$  – активное сопротивление обмотки возбуждения при температуре, соответствующей номинальному режиму работы двигателя, Ом;

$r_{*2}$  – относительное по отношению к номинальному значению активного сопротивления обмотки возбуждения, о. е.;

$I_{*2}$  – относительное по отношению к номинальному значение тока возбуждения, о. е.

$$r_{*2} = \frac{235 + \nu_0 + \tau_{2H} \cdot I_{*2}^2}{235 + \nu_0 + \tau_{2H}}. \quad (1.27)$$

где  $\tau_{2H}$  – номинальное значение превышения температуры обмотки возбуждения над температурой охлаждающей среды ВСД, °С.

Относительное значение потерь активной мощности в стали магнитопровода связаны с параметрами режима работы двигателя  $\alpha$ ,  $\beta_1$  и  $u$ :

$$\Delta p_{*3.ном} = \varepsilon_{*\sigma}^2 = \frac{u^2 + 2 \cdot x_\sigma \cdot \alpha \cdot \sqrt{(1 - \cos^2 \varphi_H)}}{x_\sigma^2 + 2 \cdot x_\sigma \cdot \sqrt{(1 - \cos^2 \varphi_H)} + 1} + \frac{x_\sigma^2 \cdot [\beta_1^2 \cdot \cos^2 \varphi_H + \alpha^2 \cdot (1 - \cos^2 \varphi_H)]}{u^2 \cdot [x_\sigma^2 + 2 \cdot x_\sigma \cdot \sqrt{(1 - \cos^2 \varphi_H)} + 1]}, \quad (1.28)$$

где  $\varepsilon_{*\sigma}$  – значение результирующей ЭДС по отношению к номинальному, о. е.;

$u_*$  – значение напряжения обмотки статора по отношению к номинальному, о. е.;

$$u_* = \frac{U_1}{U_{1.ном}}. \quad (1.29)$$

где  $U_1$  – напряжение обмоток статора двигателя отличающееся от номинального, В.

Учет явнополюсности ротора ВСД осуществляется на основании зависимостей (1.30-1.32), полученных при использовании представленной на рисунке 1.1 векторной диаграммы явнополюсного ВСД [11].

$$\varepsilon_* = u_* \cdot \cos \theta + x_d \cdot I_{*d}, \quad (1.30)$$

где  $\varepsilon_*$  – относительное значение ЭДС, индуцируемой потоком возбуждения ВСД без учета изменения насыщения магнитной цепи, о. е.;

$\theta$  – угол сдвига фаз между ЭДС, индуцируемой потоком возбуждения ВСД и напряжением обмоток статора без учета изменения насыщения магнитной цепи (угол нагрузки), рад.

$I_{*d}$  – значение тока статора по продольной оси по отношению к номинальному, о. е.

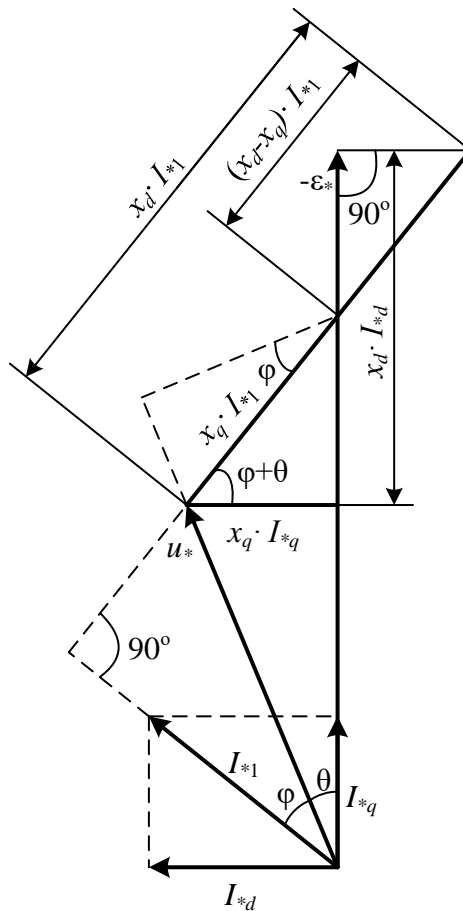


Рисунок 1.1 – Векторная диаграмма явнополюсного ВСД

$$\theta = \arctg \left( \frac{x_q \cdot I_{*1} \cdot \cos \varphi}{u_* + x_q \cdot I_{*1} \cdot \sin \varphi} \right), \quad (1.31)$$

где  $x_q$  – синхронное индуктивное сопротивление по поперечной оси ВСД, о. е.;

$\varphi$  – угол сдвига фаз между током и напряжением обмоток статора ВСД, рад.

$$I_{*d} = I_{*1} \cdot \sin(\varphi + \theta). \quad (1.32)$$

Входящий в выражения (1.30-1.32)  $I_{*1}$  связан с параметрами режима двигателя  $\alpha$ ,  $\beta_1$  и  $u_*$  соотношениями [11]:

$$I_{*1} \cdot \cos \varphi = \frac{1}{u_*} \cdot \beta_1 \cdot \cos \varphi_H, \quad (1.33)$$

$$I_{*1} \cdot \sin \varphi = \frac{1}{u_*} \cdot \alpha \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_H}. \quad (1.34)$$

Учитывая в выражениях (1.30-1.32) соотношения (1.33-1.34), получаем [11]:

$$\varepsilon_* = \frac{x_d \cdot \beta_1 \cdot \cos \varphi_H \cdot \sin \theta + (u_*^2 + x_d \cdot \alpha \cdot \sqrt{(1 - \cos^2 \varphi_H)}) \cdot \cos \theta}{u_*}, \quad (1.35)$$

$$\theta = \arctg \left( \frac{x_q \cdot \beta_1 \cdot \cos \varphi_H}{u_*^2 + x_q \cdot \alpha \cdot \sqrt{(1 - \cos^2 \varphi_H)}} \right). \quad (1.36)$$

Зависимость относительного значения тока возбуждения  $I_{*2}$  от параметров режима  $\alpha$ ,  $\beta_1$  и  $u_*$  с учетом явнополюсности ротора ВСД носит сложный характер, и на основании выражений (1.35-1.36) может быть описана [11]:

$$I_{*2}^2 = \frac{\varepsilon_*^2}{\varepsilon_{*ном}^2}. \quad (1.37)$$

где  $\varepsilon_{*ном}$  – номинальное относительное значение ЭДС, индуцируемой потоком возбуждения без учета изменения насыщения магнитной цепи, при  $\alpha = 1$ ,  $\beta_1 = 1$ ,  $u_* = 1$ , о. е.

Для учета насыщения магнитной цепи ВСД автор [11] предлагает воспользоваться диаграммой Кимбарка [39], представленной на рисунке 1.2,

которая дает возможность получить удобные для расчета аналитические выражения (в качестве базисного для относительного значения ЭДС принимается номинальное напряжение  $U_{1.ном}$  ВСД):

$$\varepsilon_{*0}^2 = (\varepsilon_* \cdot \sin \theta + \Delta\varepsilon_* \cdot \sin \sigma_p)^2 + (\varepsilon_* \cdot \cos \theta + \Delta\varepsilon_* \cdot \cos \sigma_p)^2, \quad (1.38)$$

где  $\varepsilon_{*0}$  – относительное значение ЭДС, индуцируемой потоком возбуждения с учетом изменения насыщения магнитной цепи, о. е.;

$\Delta\varepsilon_*$  – относительное значение добавочной ЭДС, зависящей от ЭДС Потье и степени насыщения магнитной цепи (ЭДС Кимбарка), о. е.;

$\sigma_p$  – угол сдвига фаз между ЭДС Потье и напряжением обмоток статора, рад.

$$\varepsilon_{*p} = \frac{u_* + x_p \cdot I_{*1} \cdot \sin \varphi}{\cos \sigma_p}, \quad (1.39)$$

где  $\varepsilon_{*p}$  – относительное значение ЭДС Потье, о. е.;

$x_p$  – индуктивное сопротивление Потье ВСД, о. е.

$$\sigma_p = \arctg \left( \frac{x_p \cdot I_{*1} \cdot \cos \varphi}{u_* + x_p \cdot I_{*1} \cdot \sin \varphi} \right). \quad (1.40)$$

Учитывая в выражениях (1.38-1.40) соотношения (1.33-1.34), получаем [11]:

$$\varepsilon_{*0}^2 = \varepsilon_*^2 + (\Delta\varepsilon_*)^2 + 2 \cdot \varepsilon_* \cdot \Delta\varepsilon_* \cdot \cos(\theta - \sigma_p), \quad (1.41)$$

$$\varepsilon_{*p} = \frac{u_*^2 + x_p \cdot \alpha \cdot \sqrt{(1 - \cos^2 \varphi_H)}}{u_* \cdot \cos \sigma_p}, \quad (1.42)$$

$$\sigma_p = \arctg \left( \frac{x_p \cdot \beta_1 \cdot \cos \varphi_H}{u_*^2 + x_p \cdot \alpha \cdot \sqrt{(1 - \cos^2 \varphi_H)}} \right). \quad (1.43)$$

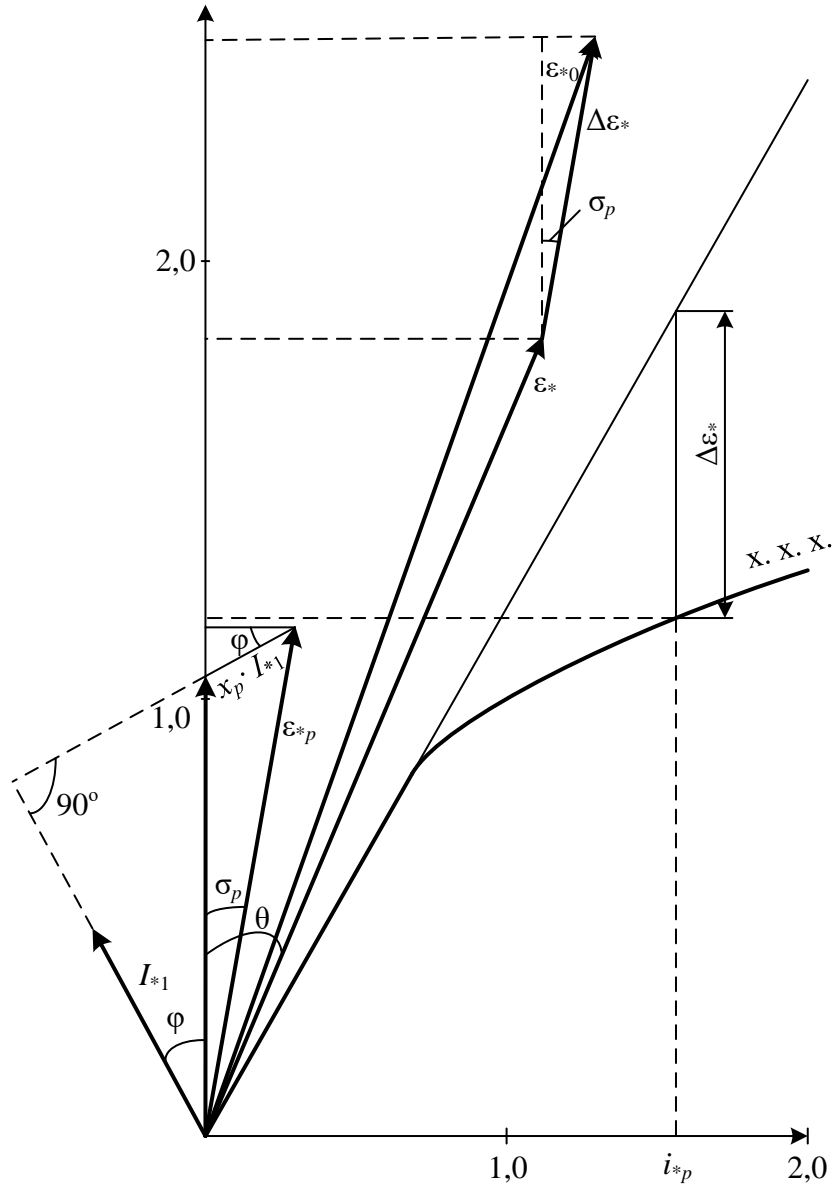


Рисунок 1.2 – Диаграмма Кимбарка

Соответствующий ЭДС Потье  $\epsilon_{*p}$  ток возбуждения по характеристике холостого хода равен  $i_{*p}$ , как следует из рисунка 1.2. Если бы магнитная цепь двигателя была не насыщенная, то разница при токе возбуждения  $i_{*p}$  соответствующих значений по спрямлённой характеристике и характеристике

холостого хода была бы равна значению  $\Delta\varepsilon_*$ . Согласно [11] значение  $\Delta\varepsilon_*$  определяется:

$$\Delta\varepsilon_* = 2,81 - 3,22 \cdot \sqrt{0,98 - 0,72 \cdot \varepsilon_{*p} - \varepsilon_{*p}}. \quad (1.44)$$

Аналогично выражению (1.37) зависимость относительного значения тока возбуждения  $I_{*2}$  от параметров режима  $\alpha$ ,  $\beta_1$  и  $u_*$  с учетом насыщения магнитной цепи на основании выражений (1.38-1.41) может быть описана [11]:

$$I_{*2}^2 = \frac{\varepsilon_{*0}^2}{\varepsilon_{*0.ном}^2}. \quad (1.45)$$

где  $\varepsilon_{*0.ном}$  – номинальное относительное значение ЭДС, индуцируемой потоком возбуждения с учетом изменения насыщения магнитной цепи, при  $\alpha = 1$ ,  $\beta_1 = 1$ ,  $u_* = 1$ , о. е.

Используя методики планирования эксперимента, на действующих предприятиях цветной металлургии, большой вклад в исследования режимов работы ВСД внес коллектив ПО «Сибэнергоцветмет» под руководством В.В. Архипенко [3].

Задача исследований состояла в установлении экспериментальной зависимости реактивной мощности ВСД от тока возбуждения и напряжения обмоток статора при заданной нагрузке на валу.

Математическая модель, полученная на основании экспериментов для расчёта реактивной мощности в ВСД, представлялась в виде следующего соотношения [3]:

$$Q = a_1 \cdot I_{*2} + a_2 \cdot u_* + a_3, \text{ при } P_2 = \text{const}. \quad (1.46)$$

где  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  – коэффициенты математической модели.



Для определения коэффициентов  $a_1, a_2, a_3$  в выражении (1.46) необходимо проведение вычислительных экспериментов на конкретном ВСД в условиях эксплуатации. Осуществление таких работ в действующих электроустановках – достаточно сложный процесс с точки зрения организации, планирования, проведения и обработки результатов, а иногда невозможный, по причине влияния таких исследований на технологический процесс предприятия.

Проведенные исследования на действующих электроустановках с ВСД позволили получить экспериментальную зависимость суммарных потерь активной мощности  $\Delta p_{\text{СД}}$  [3]:

$$\Delta p_{\text{СД}} = b_0 + b_1 \cdot I_{*1}^4 + b_2 \cdot I_{*1}^2 + b_3 \cdot I_{*2}^4 + b_4 \cdot I_{*2}^2 + b_5 \cdot Q + b_6 \cdot u_*^2. \quad (1.47)$$

где  $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_6$  – коэффициенты математической модели, кВт;

$b_5$  – коэффициент математической модели, кВт/квар;

Значение коэффициентов математической модели (1.47):

$$b_0 = \Delta p_0, \quad (1.48)$$

$$b_1 = \frac{\tau_{1\text{H}}}{275 + \tau_{1\text{H}}} \cdot \Delta p_{1.\text{НОМ}}, \quad (1.49)$$

$$b_2 = \frac{235 + v_0}{275 + \tau_{1\text{H}}} \cdot \Delta p_{1.\text{НОМ}} + \frac{x_\sigma^2}{x_\sigma^2 + 2 \cdot x_\sigma \cdot \sqrt{(1 - \cos^2 \varphi_{\text{H}}) + 1}} \cdot \Delta p_{3.\text{НОМ}}, \quad (1.50)$$

$$b_3 = \frac{\tau_{2\text{H}}}{275 + \tau_{2\text{H}}} \cdot \Delta p_{2.\text{НОМ}}, \quad (1.51)$$

$$b_4 = \frac{235 + v_0}{275 + \tau_{2\text{H}}} \cdot \Delta p_{2.\text{НОМ}}, \quad (1.52)$$

$$b_5 = \frac{2 \cdot x_{\sigma} / S_H}{x_{\sigma}^2 + 2 \cdot x_{\sigma} \cdot \sqrt{(1 - \cos^2 \varphi_H)} + 1} \cdot \Delta p_{3, \text{НОМ}}, \quad (1.53)$$

где  $S_H$  – номинальное значение полной мощности ВСД, кВА.

$$b_6 = \frac{1}{x_{\sigma}^2 + 2 \cdot x_{\sigma} \cdot \sqrt{(1 - \cos^2 \varphi_H)} + 1} \cdot \Delta p_{3, \text{НОМ}}. \quad (1.54)$$

Выражение (1.47) может быть использовано для определения потерь  $\Delta p_{\text{СД}}$  в ВСД с достаточно высокой точностью, но при проведении соответствующих исследований [3]. Определение потерь в ВСД с использованием экспериментальных математических моделей нашло применение в работе А.Н. Филатова [90].

### **1.3. Высоковольтный синхронный двигатель как активный элемент в составе системы электроснабжения промышленного предприятия с активно-адаптивными свойствами**

Как уже было сказано выше, ВСД необходимы не только для определенных технологических целей в составе электроприводов, но могут использоваться и в качестве источников реактивной мощности для повышения коэффициента мощности предприятия. ВСД применяются для самых разнообразных целей в составе электроприводов, работающих с постоянной скоростью. Это, прежде всего, крупные вентиляторы, насосы, мельницы, компрессоры и т.д. Как правило, такие двигатели выполняются явнополюсными, с частотами вращения – от 100 до 1000 оборотов в минуту [65]. На предприятиях, которые рассматриваются в работе, синхронные машины используются в качестве электроприводов, однако регулирование их входных электрических параметров позволяет реализовать ещё и другую задачу, стоящую перед энергетиками предприятия – повышение коэффициента мощности потребляемой энергии. Для этого регулирование ВСД

должно обладать требуемыми быстродействием и гибкостью, вследствие чего ВСД наделяют системы электроснабжения активно-адаптивными свойствами, основная информация и сведения, о которых будут даны ниже.

Системы электроснабжения с активно-адаптивными свойствами стали активно развиваться относительно недавно – лишь за последние 20 лет, а в последнее десятилетие в электроэнергетическом секторе России реализуется концепция интеллектуальной энергосистемы (ИЭС), которая ориентирована на переход к качественно новому уровню эффективности функционирования и развития энергосистем [34, 67].

Важной подсистемой ИЭС являются система электроснабжения промышленных предприятий, включающая распределительную электрическую сеть, активные элементы (электроприемники) и автоматизированные системы контроля и управления [77]. Основным подходом к созданию такой системы электроснабжения является повышение уровня управления режимами её функционирования.

Наиболее значимой проблемой, на решение которой направлено создание концепции ИЭС, применительно к системам электроснабжения промышленных предприятий, является управление уровнем потерь активной мощности в системе. Под управлением уровнем потерь активной мощности в системе электроснабжения промышленных предприятий подразумевается минимизация потерь за счет оптимального сочетания разных методик, применения современных технологий и технических устройств на основании выявленных зависимостей активных потерь от характера потребления электроэнергии (коэффициента мощности, формы потребляемого тока и т.д.) [77].

К основополагающим принципам реализации концепции ИЭС для управления уровнем потерь активной мощности в системе электроснабжения промышленных предприятий относятся [77]:

1. Построение единой методики, позволяющей управлять активными потерями.

2. Общая информационная модель системы электроснабжения промышленного предприятия, позволяющая моделировать режимные и схемные параметры, в том числе активные ее элементы.

3. Выделение в качестве активных элементов чувствительных узлов, реакция которых на управляющие воздействия обеспечит наибольший системный эффект от снижения потерь активной мощности.

4. Классификация и создание единого списка технологических и технических решений по управлению уровнем потерь активной мощности. Наиболее эффективным средством управления уровнем потерь активной мощности в системах электроснабжения промышленных предприятий является компенсация реактивной мощности, способствующая снижению технических и, частично, метрологических потерь активной мощности [77-79].

Активные элементы позволяют обеспечить необходимые активно-адаптивные свойства системе электроснабжения промышленного предприятия. К одному из таких свойств можно отнести адаптивную реакцию на различные отклонения параметров режима от заданных в режиме реального времени, например поддержание требуемого уровня потерь активной мощности в системе [20, 47, 48].

Под активным элементом, в частности ВСД, подразумевается управляемое устройство компенсации реактивной мощности, с помощью которого обеспечивается управление режимом реактивной мощности, а также минимизация потерь активной мощности в системе электроснабжения [67, 77].

## Выводы по главе 1

1. Промышленные предприятия со значительной установленной мощностью ВСД обладают высоким потенциалом энергосбережения и повышения энергоэффективности за счет использования компенсирующей способности этих двигателей. Основным преимуществом ВСД, определяющим эффективность их использования для компенсации реактивной мощности, являются незначительные капитальные затраты на 1 квар установленной мощности, так как они уже эксплуатируются и участвуют в технологическом процессе предприятия.

2. Анализ существующих методик определения потерь активной мощности в ВСД показал, что известные теоретические и экспериментальные подходы обладают существенными недостатками. Теоретические подходы являются достаточно универсальными и простыми, но обладают высокой погрешностью, а экспериментальные – трудоемки, либо вообще нереализуемы. Высокая погрешность теоретических методик объясняется расхождением исходных данных, используемых в расчете, и их нестабильностью в процессе эксплуатации для однотипных двигателей, которые могут достигать 23 %.

3. Для определения потерь активной мощности в ВСД в наибольшей мере подходит метод предложенный [11], в котором учитывается явнополюсность ротора; изменение насыщения магнитной цепи; нагрузку на валу двигателя; изменение напряжения обмоток статора; изменение температуры обмоток и изменение потерь активной мощности в стали магнитопровода. Однако, применение этого метод характеризуется тем, что при определении потерь активной мощности в ВСД отсутствует возможность учитывать зависимости параметров режима от управляющих воздействий, так как определение потерь активной мощности осуществляется при заданном режиме. Это обстоятельство накладывает ограничение на использование данного метода при рассмотрении ВСД в составе системы электроснабжения промышленного предприятий в качестве активного элемента.

4. ВСД являются активными элементами в составе системы электроснабжения промышленного предприятия и наделяют ее активно-адаптивными свойствами относительно различных отклонений параметров режима от заданных в режиме реального времени.

На основании изложенного направления совершенствования существующих подходов использования ВСД для повышения энергетической эффективности эксплуатации систем электроснабжения промышленных предприятий можно сформулировать следующим образом:

1. Разработать методику и программное обеспечение оценки состояния ВСД, как активного элемента в составе системы электроснабжения промышленного предприятия.

2. Разработать математическую модель обобщенной системы электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами, состоящей из линии электропередачи (система внешнего электроснабжения), силового трансформатора с РПН, токопроводов, групп высоковольтных синхронных двигателей и комплексной нагрузки, ориентированную на адекватную оценку уровня потерь активной мощности при различных управляющих воздействиях.

3. Разработать программное обеспечение для оценки уровня потерь активной мощности в системе электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами, с использованием которого произвести моделирование режимов работы и последующий анализ полученных результатов.

## 2. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ КАК АКТИВНОГО ЭЛЕМЕНТА

Под состоянием ВСД понимается совокупность значений параметров режима его работы, а именно: активная мощность, потребляемая из сети  $P_1$ , реактивная мощность  $Q$  и потери активной мощности  $\Delta p_{сд}$ , при изменении управляющих воздействий, по току возбуждения  $I_2$  и по напряжению обмоток статора  $U_1$ , и заданном значении нагрузки на валу. Для оценки состояния ВСД, как активного элемента в составе системы электроснабжения промышленного предприятия в данной работе использована математическая модель, разработанная на основании предложенного в [11] метода.

Математическая модель [11] выгодно отличается от известных [18, 27, 44, 51, 53, 64, 83, 90] тем, что при минимальном объеме исходной информации аналитически учитывает максимальное количество факторов, в том числе: явнополюсность ротора, изменения насыщения магнитной цепи, нагрузку на валу двигателя, изменения напряжения обмоток статора, изменение температуры обмоток, изменение потерь активной мощности в стали.

Для удобства использования математической модели [11] введем следующие обозначения:

$$\alpha_s = \frac{Q}{S_H} = \alpha \cdot \sqrt{(1 - \cos^2 \varphi_H)}, \quad (2.1)$$

где  $\alpha_s$  – отношение реактивной мощности к полной номинальной мощности ВСД, о. е.

$$\beta_s = \frac{P_1}{S_H} = \beta \cdot \cos \varphi_H, \quad (2.2)$$

где  $\beta_s$  – отношение активной мощности, потребляемой из сети, к полной номинальной мощности ВСД, о. е.

$$I_{*1} = \sqrt{\frac{\alpha_s^2 + \beta_s^2}{u_*^2}}, \quad (2.3)$$

где  $I_{*1}$  – относительное по отношению к номинальному значение тока статора ВД, о. е.

$$I_{*2} = \frac{I_2}{I_{2.\text{НОМ}}}. \quad (2.4)$$

где  $I_{*2}$  – относительное по отношению к номинальному значение тока возбуждения ВД, о. е.

После введенных обозначений (2.1-2.4) математическая модель [11] имеет следующий вид:

$$M_{\text{ВД}} = \left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_{*0}^2 = \varepsilon_{*0.\text{НОМ}}^2 \cdot I_{*2}^2 \\ \varepsilon_{*0}^2 = \varepsilon_*^2 + (\Delta\varepsilon_*)^2 + 2 \cdot \varepsilon_* \cdot \Delta\varepsilon_* \cdot \cos(\theta - \sigma_p) \\ \varepsilon_* = \frac{x_d \cdot \beta_s \cdot \sin \theta + (u_*^2 + x_d \cdot \alpha_s) \cdot \cos \theta}{u_*} \\ \Delta\varepsilon_* = 2,81 - 3,22 \cdot \sqrt{0,98 - 0,72 \cdot \varepsilon_{*p} - \varepsilon_{*p}} \\ \varepsilon_{*p} = \frac{u_*^2 + x_p \cdot \alpha_s}{u_* \cdot \cos \sigma_p} \\ \sigma_p = \arctg \left( \frac{x_p \cdot \beta_s}{u_*^2 + x_p \cdot \alpha_s} \right) \\ \theta = \arctg \left( \frac{x_q \cdot \beta_s}{u_*^2 + x_q \cdot \alpha_s} \right) \\ P_1 = m \cdot P_{2.\text{НОМ}} + \Delta p_0 + \Delta p_1 + \Delta p_3 \\ r_{*1} = \frac{235 + v_0 + \tau_{1\text{H}} \cdot I_{*1}^2}{235 + v_0 + \tau_{1\text{H}}} \\ r_{*2} = \frac{235 + v_0 + \tau_{2\text{H}} \cdot I_{*2}^2}{235 + v_0 + \tau_{2\text{H}}} \\ \Delta p_1 = \Delta p_{1.\text{НОМ}} \cdot r_{*1} \cdot I_{*1}^2 \\ \Delta p_2 = \Delta p_{2.\text{НОМ}} \cdot r_{*2} \cdot I_{*2}^2 \\ \Delta p_3 = \Delta p_{3.\text{НОМ}} \cdot \frac{x_\sigma^2 \cdot I_{*1}^2 + 2 \cdot x_\sigma \cdot \alpha_s + u_*^2}{x_\sigma^2 + 2 \cdot x_\sigma \cdot \sqrt{(1 - \cos^2 \varphi_{\text{H}})} + 1} \\ \Delta p_{\text{ВД}} = p_0 + \Delta p_1 + \Delta p_2 + \Delta p_3 \end{array} \right. \quad (2.5)$$



Значение отношения реактивной мощности к полной номинальной мощности ВСД  $\alpha_s$  может быть как положительным, так и отрицательным или равным нулю.

Множеству значений  $\alpha_s$  отвечает состояние ВСД:

$$\alpha_s = \begin{cases} \alpha_s < 0, \text{ с отстающим } \cos \varphi \\ \alpha_s = 0, \cos \varphi = 1 \\ \alpha_s > 0, \text{ с опережающим } \cos \varphi \end{cases}. \quad (2.6)$$

Определение потерь активной мощности в ВСД [11] осуществляется при заданных значениях параметров режима  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $u_*$ . Однако при решении задачи оценки уровня потерь активной мощности за счет использования ВСД для компенсации реактивной мощности требуется определение параметров режима  $\alpha$  и  $\beta$  в зависимости от управляющих воздействий и нагрузки на валу двигателя.

В связи с этим необходимо разработать методику и программные средства оценки состояния ВСД, для определения потребляемой активной мощности  $P_1$ , реактивной мощности  $Q$  и суммарных потерь активной мощности  $\Delta p_{\text{ВД}}$ , при управляющих воздействиях по току возбуждения  $I_2$  и по напряжению обмоток статора  $U_1$ .

В качестве исходных данных в разрабатываемой методике необходимо использовать условно-постоянную информацию о ВСД из заводского формуляра, представленного в Приложении А, а именно: частоту вращения,  $n_n$ , об/мин; температура охлаждающей среды,  $\nu_0$ , °С; номинальное значение активной мощности,  $P_{2.\text{НОМ}}$ , кВт; номинальное значение напряжения обмоток статора,  $U_{1.\text{НОМ}}$ , кВ; номинальное значение полной мощности,  $S_n$ , кВ·А; номинальное значение коэффициента мощности,  $\cos \varphi_n$ , о. е.; синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси,  $x_d$ , о. е.; синхронное индуктивное сопротивление по поперечной оси,  $x_q$ , о. е.; индуктивное сопротивление Потье,  $x_p$ , о. е.; номинальное значение превышения температуры обмотки статора над температурой охлаждающей среды,  $\tau_{1n}$ , °С; номинальное значение превышения

температуры обмотки ротора над температурой охлаждающей среды,  $\tau_{2н}$ , °С; номинальное значение потерь активной мощности на трение и вентиляцию,  $p_0$ , кВт; номинальное значение потерь активной мощности в обмотках статора синхронного двигателя,  $p_{1.ном}$ , кВт; номинальное значение потерь активной мощности в обмотке ротора,  $p_{2.ном}$ , кВт; номинальное значение потерь активной мощности в стали магнитопровода,  $p_{3.ном}$ , кВт.

## 2.1. Методика и алгоритм оценки состояния высоковольтного синхронного двигателя

Задача оценки состояния ВСД на основании математических зависимостей (2.5) заключается в том, чтобы для заданных значений  $\beta_s$ ,  $I_{*2}$  и  $u_*$  найти значения  $P_1$ ,  $Q$  и  $\Delta p_{сд}$ .

Для оценки состояния ВСД необходимо решить следующую систему уравнений относительно  $\alpha_s$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_{*0}^2 = \varepsilon_{*0.ном}^2 \cdot I_{*2}^2 \\ \varepsilon_{*0}^2 = \varepsilon_*^2 + (\Delta\varepsilon_*)^2 + 2 \cdot \varepsilon_* \cdot \Delta\varepsilon_* \cdot \cos(\theta - \sigma_p) \\ \varepsilon_* = \frac{x_d \cdot \beta_s \cdot \sin \theta + (u_*^2 + x_d \cdot \alpha_s) \cdot \cos \theta}{u_*} \\ \Delta\varepsilon_* = 2,81 - 3,22 \cdot \sqrt{0,98 - 0,72 \cdot \varepsilon_{*p} - \varepsilon_{*p}} \\ \varepsilon_{*p} = \frac{u_*^2 + x_p \cdot \alpha_s}{u_* \cdot \cos \sigma_p} \\ \sigma_p = \arctg \left( \frac{x_p \cdot \beta_s}{u_*^2 + x_p \cdot \alpha_s} \right) \\ \theta = \arctg \left( \frac{x_q \cdot \beta_s}{u_*^2 + x_q \cdot \alpha_s} \right) \end{array} \right. \quad (2.7)$$

Данные уравнения являются частью системы уравнений (2.5).

Если представить 1-е и 2-е уравнения системы (2.7) через функции одной  $\psi_1(I_{*2})$  и нескольких переменных  $\psi_2(\beta_S, \alpha_S, u_*)$  соответственно, то

$$\psi_1(I_{*2}) = \varepsilon_{*0}^2 = \varepsilon_{*0, \text{ном}}^2 \cdot I_{*2}^2, \quad (2.8)$$

$$\psi_2(\beta_S, \alpha_S, u_*) = \varepsilon_{*0}^2 = \varepsilon_*^2 + (\Delta\varepsilon_*)^2 + 2 \cdot \varepsilon_* \cdot \Delta\varepsilon_* \cdot \cos(\theta - \sigma_p). \quad (2.9)$$

Это позволяет, при условии равенства функций  $\psi_1(I_{*2})$  и  $\psi_2(\beta_S, \alpha_S, u_*)$ , установить аналитически связи  $\beta_S, \alpha_S, u_*$  и  $I_{*2}$ .

Если значения функций (2.8) и (2.9) равны, а их разность записать через функцию  $\psi_3(I_{*2}, \beta_S, \alpha_S, u_*)$ , тогда

$$\psi_3(I_{*2}, \beta_S, \alpha_S, u_*) = \psi_1(I_{*2}) - \psi_2(\beta_S, \alpha_S, u_*) = 0, \quad (2.10)$$

Решение функции (2.10), согласно разработанной методике, представленной ниже, относительно  $\alpha_S$  позволяет оценивать состояния ВСД. Для этого переменные  $\varepsilon_*, \varepsilon_{*0}, \Delta\varepsilon_*$ , содержащиеся в формулах (2.8) и (2.9), следует выразить через первые четыре выражения системы (2.5).

Методика оценки состояния ВСД состоит из двух этапов [68]:

Этап №1. Определение параметров номинального режима.

Необходимо принять:

$$\alpha_S = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_H}, \quad (2.11)$$

$$\beta_S = \cos \varphi_H, \quad (2.12)$$

$$u_* = 1. \quad (2.13)$$

Из математической модели (2.5), используя выражения (2.11-2.13), определить  $\theta$ ,  $\sigma_p$ ,  $\varepsilon_{*p}$ ,  $\Delta\varepsilon_*$ ,  $\varepsilon_{*}$ ,  $\varepsilon_{*0}$ . Принять:

$$\varepsilon_{*0.\text{ном}} = \varepsilon_{*0}. \quad (2.14)$$

Этап №2. Определение параметров заданного режима.

Для определения параметров заданного режима необходимо задаться значениями:

- 1) относительного значения тока возбуждения  $I_{*2}$ , о.е.;
- 2) относительного значения напряжения обмотки статора ВСД (в долях от номинального значения)  $u_*$ , о. е.;
- 3) относительного значения момента на валу ВСД (в долях от номинального значения)  $m$ , о.е.

Момент на валу ВСД определяется по зависимости [21]:

$$M_2 = \frac{60 \cdot 10^3}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{P_2}{n_H}. \quad (2.15)$$

где  $M_2$  – механический момент на валу двигателя, Н·м;

$n_H$  – номинальная частота вращения ротора двигателя, об/мин.

На основании выражения (2.15)  $M_2$  пропорционально  $P_2$  и по отношению к своим номинальным значениям определяется величиной  $m$ :

$$\frac{M_2}{M_{2.\text{ном}}} = \frac{P_2}{P_{2.\text{ном}}} = m. \quad (2.16)$$

где  $M_{2.\text{ном}}$  – номинальный механический момент на валу двигателя, Н·м;

$m$  – относительное значение момента на валу ВСД, о. е.

Значение  $m$  задается для определения  $P_1$ , а далее  $\beta_s$  по (2.5) и по (2.2) соответственно. Однако, для определения  $P_1$  необходимо задаться начальными значениями  $\Delta p_1 = \Delta p_{1.\text{ном}}$  и  $\Delta p_3 = \Delta p_{3.\text{ном}}$ .

Значения  $I_{*2}$  и  $u_*$  задаются для решения уравнения (2.10) относительно  $\alpha_s$  с использованием математической модели (2.5). Далее по (2.3) определяются  $I_{*1}$ , по (2.5)  $r_{*1}$ ,  $r_{*2}$ ,  $\Delta p_2$  и уточняются значения  $\Delta p_1$  и  $\Delta p_3$ .

По определенным значениям параметров заданного режима  $\alpha_s$ ,  $\Delta p_1$ ,  $\Delta p_2$  и  $\Delta p_3$  рассчитываются по (2.5) значения  $P_1$ , по (2.1)  $Q$  и по (2.5)  $\Delta p_{\text{сд}}$ .

Функция (2.10) является нелинейной относительно функции (2.9), решение которой осуществить аналитическими методами [32, 61] достаточно сложно, так как значение  $\alpha_s$  является неизвестным. Учитывая то, что функция (2.9) является дифференцируемой и существует возможность выбора начального приближения  $\alpha_0$  [89], целесообразно при поиске корней функции (2.10) использовать, один из самых эффективных методов решения нелинейных задач, итерационный метод Ньютона [10, 31, 33, 99].

Метод сводится к следующему (решение относительно  $\alpha_s$ ) [31, 99]:

1) имея начальное приближение  $\alpha_0$  [89] решение функции (2.10), последующие приближения  $\alpha$  определяются:

$$\alpha_{j+1} = \alpha_j - \frac{\psi_2(\beta_s, \alpha_s, u_*)}{\psi_2'(\beta_s, \alpha_s, u_*)}. \quad (2.17)$$

где  $j$  – номер итерации;

$\psi_2'(\beta_s, \alpha_s, u_*)$  – частная производная функции  $\psi_2(\beta_s, \alpha_s, u_*)$  по  $\alpha_s$ .

Начальное приближение  $\alpha_0$  без учёта явнополюсности ротора ( $x_d = x_q$ ) и изменения насыщения магнитной цепи ( $\Delta \varepsilon_* = 0$ ), определяется по (2.10) с учетом (2.7-2.9) [89]:

$$\alpha_0 = \frac{u_*}{x_d} \cdot \sqrt{\varepsilon_{*НОМ}^2 \cdot I_{*2}^2 - x_d^2 \cdot \frac{\beta_s^2}{u_*^2} - \frac{u_*^2}{x_d}}, \quad (2.18)$$

$$\varepsilon_{*НОМ} = x_d^2 + 2 \cdot x_d \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_H} + 1. \quad (2.19)$$

2) за решение принимается  $n$ -ое приближение  $\alpha_n$  когда:

$$\Psi_3(I_{*2}, \beta_s, \alpha_s, u_*) \leq \zeta. \quad (2.20)$$

где  $\zeta$  – заданная точность решения.

Частная производная  $\Psi_2'(\beta_s, \alpha_s, u_*)$  из (2.17) определяется выражением:

$$\begin{aligned} \Psi_2'(\beta_s, \alpha_s, u_*) &= \frac{\partial \varepsilon_{*0}^2}{\partial \alpha_s} = \frac{\partial (\varepsilon_*^2 + (\Delta \varepsilon_*)^2 + 2 \cdot \varepsilon_* \cdot \Delta \varepsilon_* \cdot \cos(\theta - \sigma_p))}{\partial \alpha_s} = \\ &= \frac{\partial \varepsilon_*^2}{\partial \alpha_s} + \frac{\partial (\Delta \varepsilon_*)^2}{\partial \alpha_s} + \frac{\partial (2 \cdot \varepsilon_* \cdot \Delta \varepsilon_* \cdot \cos(\theta - \sigma_p))}{\partial \alpha_s}, \end{aligned} \quad (2.21)$$

Для удобства определим все частные производные из (2.21):

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon_*^2}{\partial \alpha_s} &= \frac{\partial \left( \left( \frac{x_d \cdot \beta_s \cdot \sin \theta + (u_*^2 + x_d \cdot \alpha_s) \cdot \cos \theta}{u_*} \right)^2 \right)}{\partial \alpha_s} = \\ &= 2 \cdot \frac{x_d \cdot \cos \theta}{u_*} \cdot \left( \frac{x_d \cdot \beta_s \cdot \sin \theta + (u_*^2 + x_d \cdot \alpha_s) \cdot \cos \theta}{u_*} \right), \end{aligned} \quad (2.22)$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial(\Delta\varepsilon_*)^2}{\partial\alpha_s} &= \frac{\partial\left((2,81 - 3,22 \cdot \sqrt{0,98 - 0,72 \cdot \varepsilon_{*p}} - \varepsilon_{*p})^2\right)}{\partial\alpha_s} = \\
&= \frac{\partial\left(\left(2,81 - 3,22 \cdot \sqrt{0,98 - 0,72 \cdot \frac{u_*^2 + x_p \cdot \alpha_s}{u_* \cdot \cos \sigma_p}} - \frac{u_*^2 + x_p \cdot \alpha_s}{u_* \cdot \cos \sigma_p}\right)^2\right)}{\partial\alpha_s} = \\
&= -2 \cdot \left( \frac{x_p}{u_* \cdot \cos \sigma_p} - \frac{1,1592 \cdot x_p}{u_* \cdot \cos \sigma_p \cdot \sqrt{0,98 - 0,72 \cdot \frac{u_*^2 + x_p \cdot \alpha_s}{u_* \cdot \cos \sigma_p}}} \right) \cdot \\
&\cdot \left( 2,81 - 3,22 \cdot \sqrt{0,98 - 0,72 \cdot \frac{u_*^2 + x_p \cdot \alpha_s}{u_* \cdot \cos \sigma_p}} - \frac{u_*^2 + x_p \cdot \alpha_s}{u_* \cdot \cos \sigma_p} \right)
\end{aligned} \tag{2.23}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial(2 \cdot \varepsilon_* \cdot \Delta\varepsilon_* \cdot \cos(\theta - \sigma_p))}{\partial\alpha_s} &= \frac{\partial\left(2 \cdot \left(\frac{x_d \cdot \beta_s \cdot \sin \theta + (u_*^2 + x_d \cdot \alpha_s) \cdot \cos \theta}{u_*}\right) \cdot \right. \\
&\cdot \left. \left(2,81 - 3,22 \cdot \sqrt{0,98 - 0,72 \cdot \frac{u_*^2 + x_p \cdot \alpha_s}{u_* \cdot \cos \sigma_p}} - \frac{u_*^2 + x_p \cdot \alpha_s}{u_* \cdot \cos \sigma_p}\right) \cdot \cos(\theta - \sigma_p)\right)}{\partial\alpha_s} = \\
&= -2 \cdot \left( \frac{x_p}{u_* \cdot \cos \sigma_p} - \frac{1,1592 \cdot x_p}{u_* \cdot \cos \sigma_p \cdot \sqrt{0,98 - 0,72 \cdot \frac{u_*^2 + x_p \cdot \alpha_s}{u_* \cdot \cos \sigma_p}}} \right) \cdot \\
&\cdot \left( \frac{x_d \cdot \beta_s \cdot \sin \theta + (u_*^2 + x_d \cdot \alpha_s) \cdot \cos \theta}{u_*} \right) \cdot \cos(\theta - \sigma_p) + \\
&+ 2 \cdot \frac{x_d \cdot \cos \theta}{u_*} \cdot \left( 2,81 - 3,22 \cdot \sqrt{0,98 - 0,72 \cdot \frac{u_*^2 + x_p \cdot \alpha_s}{u_* \cdot \cos \sigma_p}} - \right. \\
&\quad \left. - \frac{u_*^2 + x_p \cdot \alpha_s}{u_* \cdot \cos \sigma_p} \right) \cdot \cos(\theta - \sigma_p)
\end{aligned} \tag{2.24}$$

Для упрощения выражений (2.23-2.25) введём обозначения:

$$\frac{x_d \cdot \cos \theta}{u_*} = Y, \tag{2.25}$$

$$\frac{x_p}{u_* \cdot \cos \sigma_p} - \frac{1,1592 \cdot x_p}{u_* \cdot \cos \sigma_p \cdot \sqrt{0,98 - 0,72 \cdot \frac{u_*^2 + x_p \cdot \alpha_s}{u_* \cdot \cos \sigma_p}}} = V, \quad (2.26)$$

тогда выражение (2.21) с учетом (2.25-2.26) принимает вид:

$$\Psi_2'(\beta_s, \alpha_s, u_*) = \frac{\partial \varepsilon_{*0}^2}{\partial \alpha_s} = 2 \cdot (Y \cdot \varepsilon_* - V \cdot \Delta \varepsilon_* - [V \cdot \varepsilon_* - Y \cdot \Delta \varepsilon_*] \cos(\theta - \sigma_p)) \quad (2.27)$$

При учете (2.9) и (2.27) выражение (2.17) можно представить в следующем виде:

$$\alpha_{j+1} = \alpha_j - \frac{\varepsilon_*^2 + (\Delta \varepsilon_*)^2 + 2 \cdot \varepsilon_* \cdot \Delta \varepsilon_* \cdot \cos(\theta - \sigma_p)}{2 \cdot (Y \cdot \varepsilon_* - V \cdot \Delta \varepsilon_* - [V \cdot \varepsilon_* - Y \cdot \Delta \varepsilon_*] \cos(\theta - \sigma_p))} \quad (2.28)$$

Блок-схема алгоритма оценки состояния ВСД при заданных значениях  $I_{*2}$ ,  $u_*$  и  $m$ , представлена на рисунке 2.1, где [56, 101]:

- 1) терминатор: начало алгоритма;
- 2) ввод-вывод: ввод исходных данных (Приложение А);
- 3) процесс: вычисление относительных параметров номинального режима с учётом заданных абсолютных параметров (активная и полная мощности, токи, напряжения). По выражениям (2.11-2.13) определяются значения  $\alpha_s$ ,  $\beta_s$  и  $u_*$ , далее рассчитываются по математической модели (2.5) значения  $\theta$ ,  $\sigma_p$ ,  $\varepsilon_{*p}$ ,  $\Delta \varepsilon_*$ ,  $\varepsilon_*$ ,  $\varepsilon_{*0}$  и принимается  $\varepsilon_{*0.ном} = \varepsilon_{*0}$ .
- 4) процесс: задаются величины  $I_{*2}$ ,  $u_*$  и  $m$ ;
- 5) процесс: задается номер начальной итерации  $j$ ;
- 6) решение: при условии, если номер итерации  $j = 0$ , «да», то выполняется блок 7, если «нет», то выполняется блок 8;



7) процесс: определение начального приближения, принимаются  $\Delta p_1 = \Delta p_{1.\text{ном}}$  и  $\Delta p_3 = \Delta p_{3.\text{ном}}$ , далее определяется по (2.5)  $P_1$  и  $\beta_s$ , по (2.18)  $\alpha_0$ , где  $\varepsilon_{*\text{ном}}$  рассчитывается по (2.19).

8) решение: необходимо решить выражение (2.10), если  $\psi_3(I_{*2}, \beta_s, \alpha_s, u_*) = 0$ , «да», то выполняется блок 13, если «нет», то выполняется блок 9;

9) процесс: рассчитать по (2.5)  $I_{*1}$  и  $r_{*1}$ , а также уточнить значения  $\Delta p_1$  и  $\Delta p_3$  соответствующей итерации;

10) процесс: рассчитать по (2.5)  $P_1$  и  $\beta_s$ , используя уточнённые значения  $\Delta p_1$  и  $\Delta p_3$  определенные в блоке 9;

11) процесс: определить последующее приближение  $\alpha_s$  по (2.28) относительно  $\alpha_0$ ;

12) решение: решить выражение (2.10) относительно  $\alpha_s$ , значение которого определено в блоке 11, и сравнить с  $\zeta$  на основании условия (2.20), если «да», то выполняется блок 13, «нет», то выполняется блок 16;

13) процесс: рассчитать по (2.5)  $r_{*2}$  и определить  $\Delta p_2$ ;

14) процесс: рассчитать по (2.5)  $\Delta p_{\text{сд}}$  и по (2.1)  $Q$ ;

15) ввод-вывод: вывод  $P_1$ ,  $Q$  и  $\Delta p_{\text{сд}}$ ;

16) процесс: присвоить начальному значению приближения  $\alpha_0$  значение  $\alpha_s$  определенное в блоке 11;

17) процесс: переход к следующей итерации  $j + 1$ ;

18) терминатор: конец алгоритма.

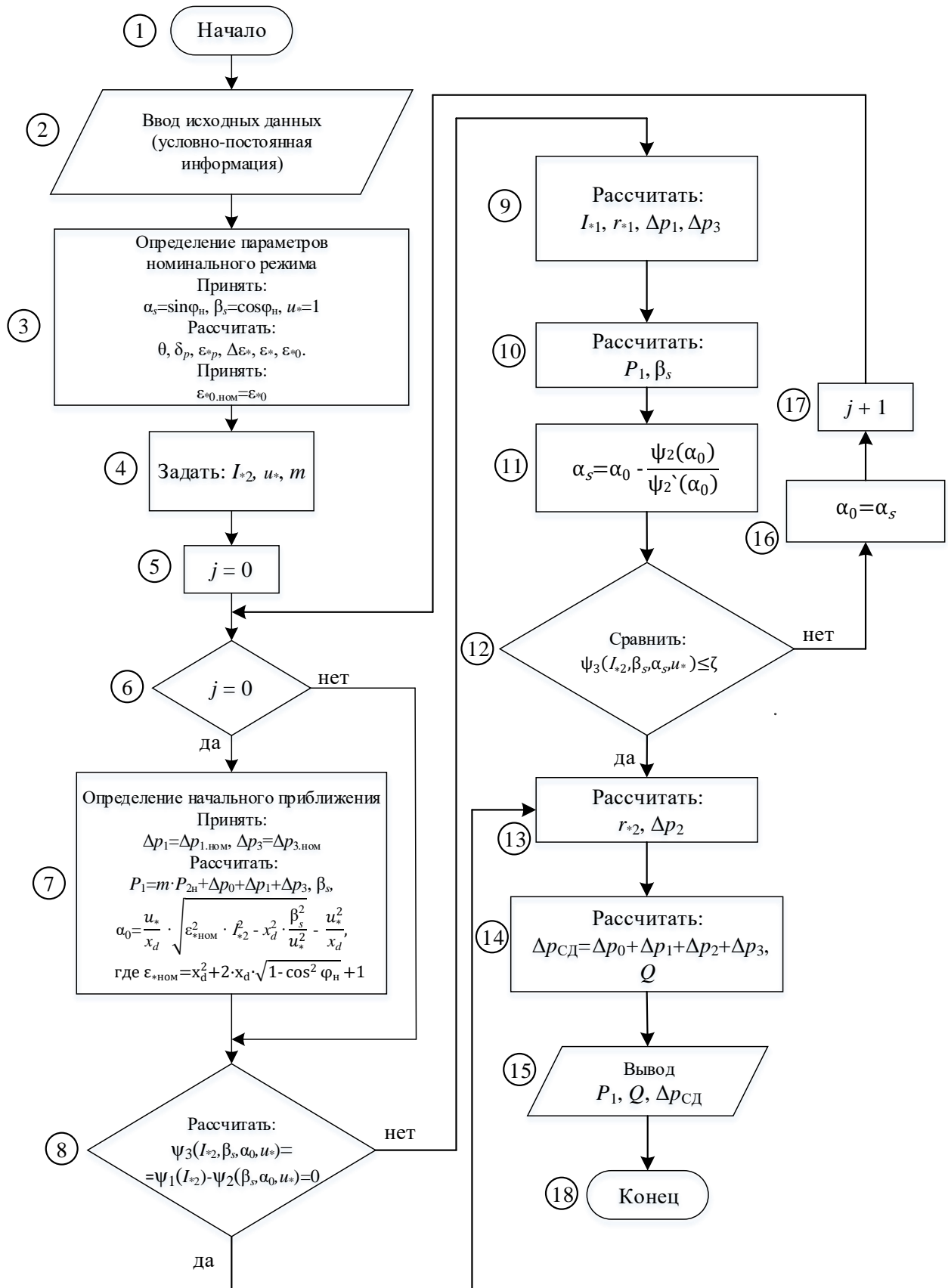


Рисунок 2.1 – Блок-схема алгоритма оценки состояния ВСД

## 2.2. Программа оценки состояния высоковольтного синхронного двигателя

Задачей разработки программы оценки состояния является реализация методики и алгоритма определения  $P_1$ ,  $Q$ ,  $\Delta p_{\text{СД}}$  в зависимости от управляющих воздействий  $I_2$ ,  $U_1$ .

Программа разработана с использованием математических зависимостей и в соответствии с алгоритмом, приведенным в данной главе [7, 14, 37, 97]. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ представлено в приложении Д (№2021680084 от 07.12.2021) [81].

Программа оценки состояния ВСД обладает следующим функционалом:

- 1) определение  $P_1$ ,  $Q$ ,  $\Delta p_{\text{СД}}$  при заданных значениях  $I_{*2}$ ,  $u_*$  и  $m$ , при использовании исходных данными, представленными в Приложении А;
- 2) исследование состояний ВСД, а именно режимов реактивной  $Q$  и потерь активной мощности  $\Delta p_{\text{СД}}$  при управляющих воздействиях по току возбуждения  $I_2$  и по напряжению обмоток статора  $U_1$ .

Определение  $P_1$ ,  $Q$ ,  $\Delta p_{\text{СД}}$  при заданных значениях  $I_{*2}$ ,  $u_*$  и  $m$  осуществляется следующим образом:

- 1) «Ввод условно-постоянной информации о СД», окно интерфейса программы представлено на рисунке 2.2. Ввод исходных данных может быть осуществлен через выпадающий список «Тип двигателя» и нажатием кнопки «Обновить данные», либо непосредственно вводом исходных данных в окно интерфейса программы. Значения параметров  $n_n$ ,  $v_0$ ,  $P_{2n}$ ,  $U_{1n}$ ,  $S_n$ ,  $\tau_{1n}$ ,  $\tau_{2n}$ ,  $p_{0n}$ ,  $p_{1n}$ ,  $p_{2n}$ ,  $p_{3n}$  задаются в именованных единицах, а  $\cos \varphi_n$ ,  $x_d$ ,  $x_q$ ,  $x_p$ ,  $x_\sigma$  в относительных.

- 2) «Оценка состояния СД», окно интерфейса программы представлено на рисунке 2.3. Для определения параметров заданного режима, слева в окне интерфейса программы, необходимо ввести значения управляющих воздействий, таких как ток возбуждения СД  $I_{*2}$  и напряжение обмоток статора СД  $u_*$ , а также

момент на валу СД  $m$ . Значения управляющих воздействий и момента задаются в относительных единицах. Расчет параметров заданного режима осуществляется нажатием кнопки «Расчёт» и, справа в окне интерфейса программы, выводятся значения потребляемой активной мощности СД  $P_1$ , реактивной мощности СД  $Q$  и потерь активной мощности в СД  $\Delta p_{\text{СД}}$ .

Parameter	Value
пн, об/мин	150
$V_0$ , °C	35
$P_2$ , кВт	900
$U_{1н}$ , кВ	6
$S_n$ , кВА	1070
cosφн, о.е.	0,9
$x_d$ , о.е.	0,673
$x_q$ , о.е.	0,448
$x_p$ , о.е.	0,125
$t_{1н}$ , °C	51
$t_{2н}$ , °C	67
$r_{0н}$ , кВт	5,2
$r_{1н}$ , кВт	19,46
$r_{2н}$ , кВт	23,5
$r_{Эн}$ , кВт	22,74

Рисунок 2.2 –Окно ввода условно-постоянной информации о СД

Ток возбуждения СД, о.е.	1,0	Активная мощность СД, кВт	946,93
Напряжение статора СД, о.е.	1,0	Реактивная мощность СД, квар	471,79
Момент на валу СД, о.е.	1,0	Потери активной мощности в СД, кВт	70,43

Рисунок 2.3 –Окно оценки состояния СД

Исследование состояний ВСД осуществляется по результатам вычислительных экспериментов на основе полного факторного эксперимента [18, 85].

Независимые величины (факторы): ток возбуждения СД  $I_{*2}$ , напряжение статора СД  $u_*$  и момент на валу СД  $m$ , т. е. количество факторов  $K = 3$ .

Зависимые величины (отклики): потребляемая активная мощность СД  $P_1$ , реактивная мощность СД  $Q$  и потери активной мощности в СД  $\Delta p_{\text{СД}}$ , т. е. количество откликов  $G = 3$ .

Объем полного факторного эксперимента зависит от количества уровней факторов  $M$  и определяется количеством проводимых опытов  $N$ :

$$N = M^K. \quad (2.29)$$

Границы изменения факторов определяются:

$$I_{*2.min} \leq I_{*2} \leq I_{*2.max}, \quad (2.30)$$

где  $I_{*2.min}$  – минимальное значение тока возбуждения, о. е.;

$I_{*2.max}$  – максимальное значение тока возбуждения, о. е.

$$u_{*.min} \leq u_* \leq u_{*.max}, \quad (2.31)$$

где  $u_{*.min}$  – минимальное значение напряжения статора, о. е.;

$u_{*.max}$  – максимальное значение напряжения статора, о. е.

$$m_{min} \leq m \leq m_{max}. \quad (2.32)$$

где  $m_{min}$  – минимальное значение момента на валу, о. е.;

$m_{max}$  – максимальное значение момента на валу, о. е.

Средний интервал изменения факторов определяется:

$$\Delta I_{*2} = \frac{I_{*2.max} - I_{*2.min}}{M}, \quad (2.33)$$

где  $\Delta I_{*2}$  – средний интервал изменения тока возбуждения, о. е.

$$\Delta u_* = \frac{u_{*.max} - u_{*.min}}{M}, \quad (2.34)$$

где  $\Delta u$  – средний интервал изменения напряжения обмоток статора, о. е.

$$\Delta m = \frac{m_{max} - m_{min}}{M}, \quad (2.35)$$

где  $\Delta m$  – средний интервал изменения момента на валу, о. е.

Вычислительный эксперимент производится следующим образом:

1) «Подготовка вычислительного эксперимента», окно интерфейса программы представлено на рисунке 2.4. На основании плана полного факторного эксперимента вводится количество уровней факторов, а также границы изменения уровней факторов таких, как ток возбуждения СД  $I_{*2}$ , напряжение статора СД  $u_*$  и момент на валу СД  $m$ . При нажатии кнопки «Расчёт» моделируются параметры состояния. Границы изменения уровней факторов задаются в относительных единицах.

2) «Эксперимент», окно интерфейса программы представлено на рисунке 2.5. В этом окне представлены: план полного факторного эксперимента, результаты вычислительного эксперимента и графические зависимости функций реактивной мощности от тока возбуждения СД  $Q(I_{*2})$  и напряжения обмоток статора СД  $Q(u_*)$  при заданном значении момента на валу СД  $m$ , которое можно

изменять. Изменение момента на валу СД  $t$  обеспечивается за счет выбора из выпадающего списка соответствующего значения момента и последующего нажатия кнопки «Обновить», при этом на основании внесенных изменений обновятся графические зависимости.

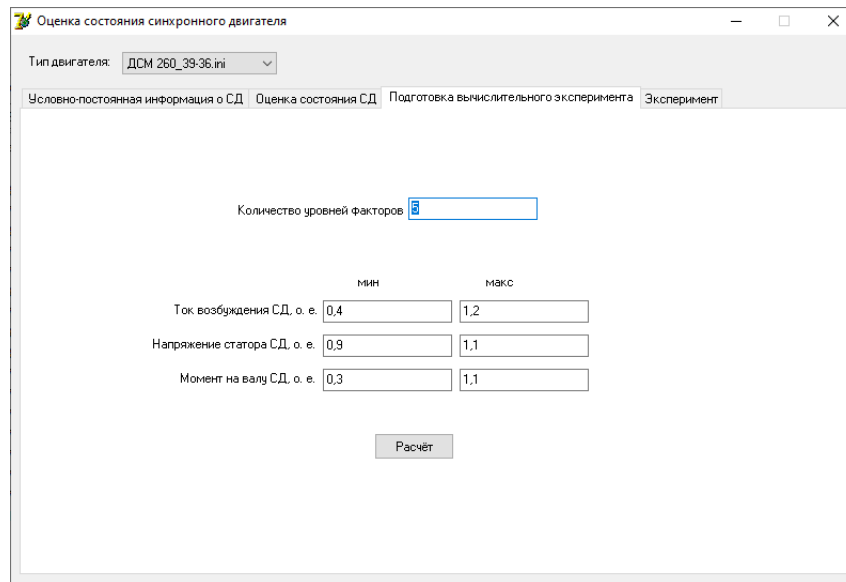


Рисунок 2.4 – Окно подготовки вычислительного эксперимента

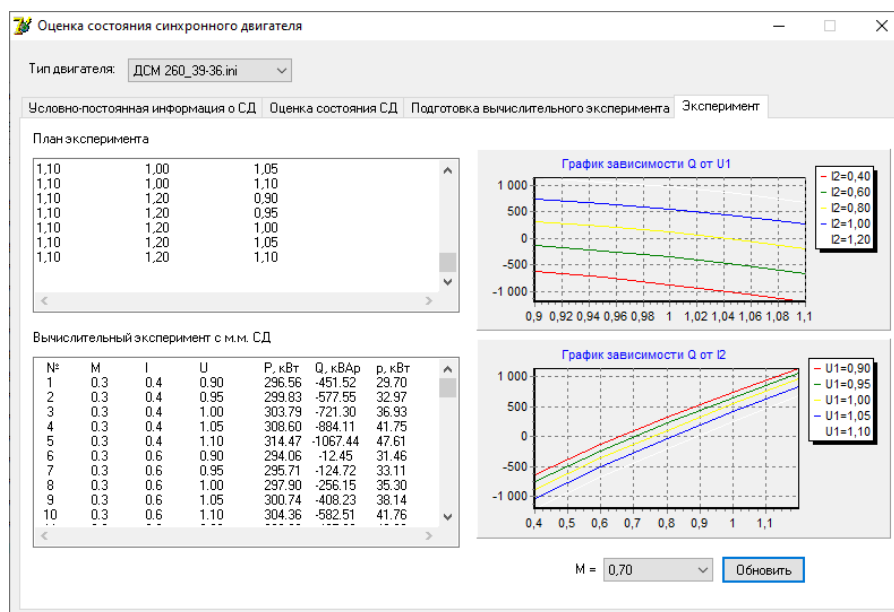


Рисунок 2.5 – Окно эксперимента

### 2.3. Исследование состояний высоковольтного синхронного двигателя

Задачей проведения вычислительного эксперимента с использованием разработанной программы является исследование состояний ВСД для оценки регулирующих эффектов при изменении управляющих воздействий, оказывающих влияние на режим суммарных потерь активной  $\Delta p_{\text{СД}}$  и генерации или потребления реактивной  $Q$  [69] мощностей ВСД.

План полного факторного эксперимента [5, 59], на основании которого осуществлены исследования, включает в себя [68]:

- 1) количество факторов  $K = 3$ , к ним относится ток возбуждения ВСД  $I_{*2}$ , напряжение статора ВСД  $u_*$  и момент на валу ВСД  $m$ ;
- 2) количество откликов  $G = 3$ , к ним относится потребляемая активная мощность ВСД  $P_1$ , реактивная мощность ВСД  $Q$  и потери активной мощности в ВСД  $\Delta p_{\text{СД}}$ ;
- 3) количество уровней факторов  $M = 5$ , при этом количество проводимых опытов будет составлять по (2.29)  $N = 125$ ;
- 4) границы изменения факторов: ток возбуждения ВСД  $I_{*2}$ , от 0,4 до 1,2; напряжение обмоток статора ВСД  $u_*$ , от 0,9 до 1,1 [28]; момент на валу ВСД  $m$ , от 0,3 до 1,1.

План полного факторного эксперимента и результаты вычислительного эксперимента представлены в Приложении Б. Графические зависимости, полученные в результате вычислительного эксперимента при  $m = 0,7$ , представлены на рисунках 2.6-2.9.



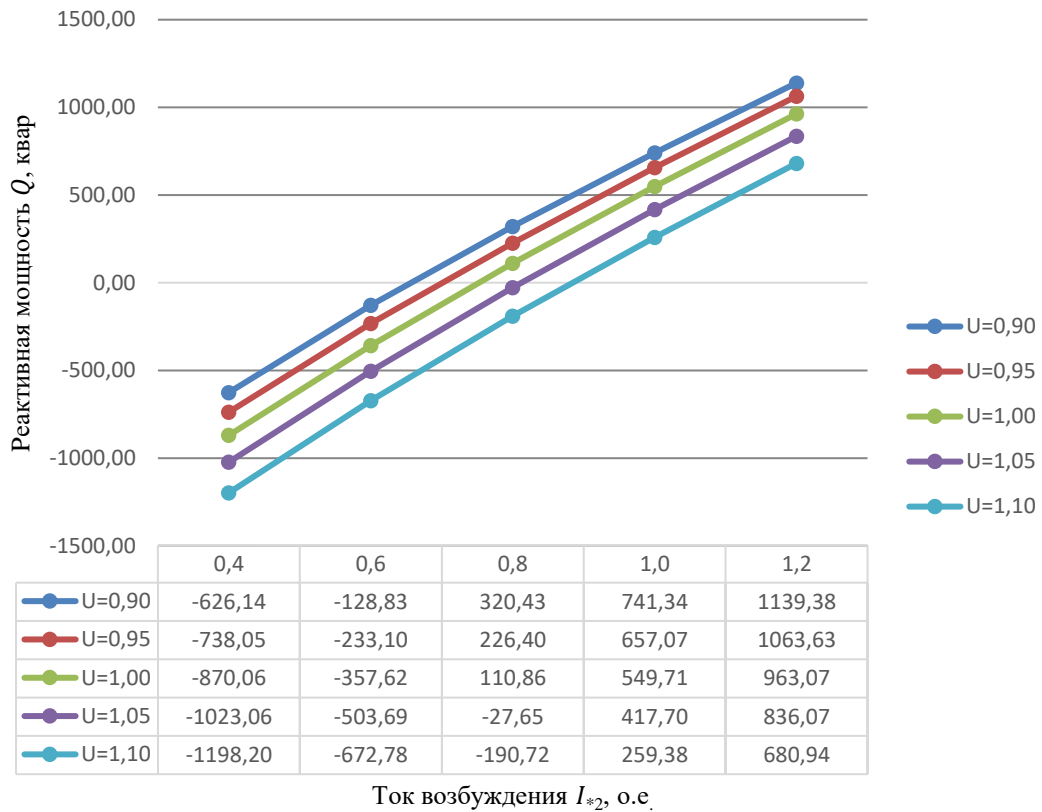


Рисунок 2.6 – Графические зависимости реактивной мощности  $Q$  от тока возбуждения  $I_{*2}$  при фиксированных значениях напряжения статора  $u_*$  ВСД

Зависимость значения реактивной мощности  $Q$  от тока возбуждения  $I_{*2}$ , в рассматриваемом диапазоне изменений, носит практически линейный возрастающий характер, причём при увеличении значения тока возбуждения  $I_{*2}$  и уменьшении значения напряжения статора  $u_*$  ВСД наблюдается увеличение генерации реактивной мощности  $Q$ . Следует отметить, что изменения тока возбуждения  $I_{*2}$  в сторону увеличения приводят в среднем к сильному изменению реактивной мощности  $Q$  на величину 1827,7 квар, при условии, что номинальная реактивная мощность двигателя  $Q_n$  составляет 469,9 квар, а изменения напряжения статора  $u$  в сторону уменьшения в среднем к слабому изменению реактивной мощности  $Q$  на величину 513,5 квар. Под изменением реактивной мощности  $Q$  на определенную величину подразумевается разность между

значениями реактивной мощности  $Q$  в режимах недовозбуждения и перевозбуждения ВСД. Положительные значения реактивной мощности  $Q$  соответствуют режиму перевозбуждения, а отрицательные, режиму недовозбуждения.

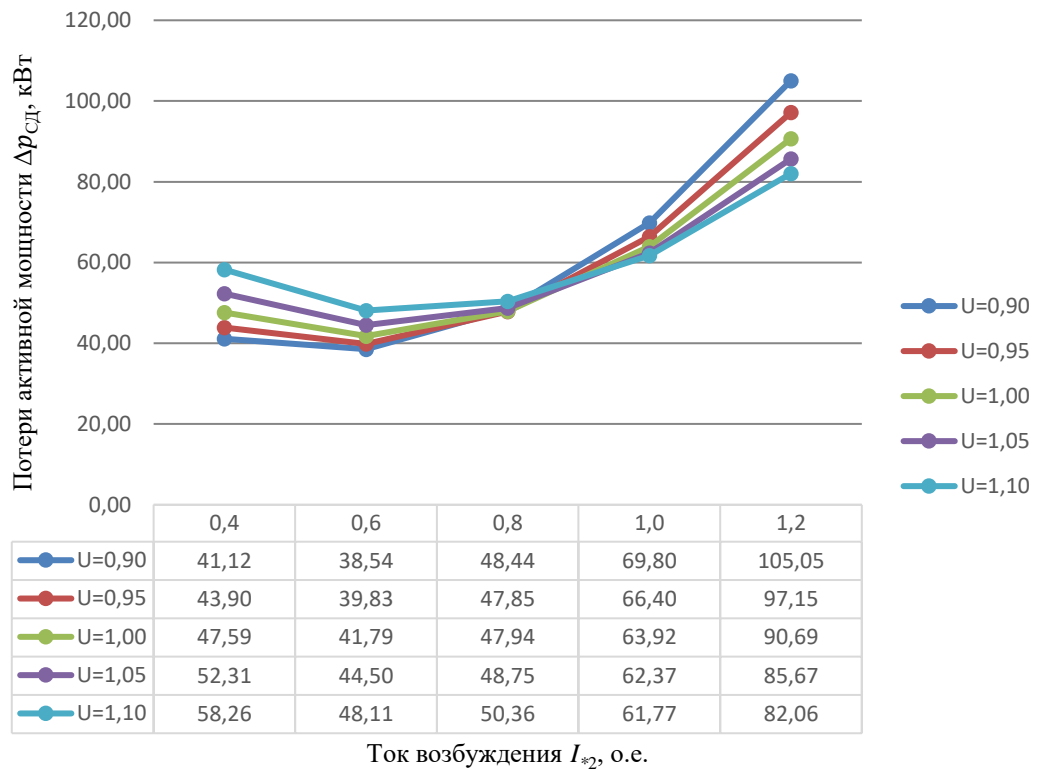


Рисунок 2.7 – Графические зависимости потерь активной мощности  $\Delta p_{сд}$  от тока возбуждения  $I_{*2}$  при фиксированных значениях напряжений статора  $u_*$  ВСД

Зависимость потерь активной мощности  $\Delta p_{сд}$  от тока возбуждения  $I_{*2}$ , в рассматриваемом диапазоне изменений, носит нелинейный характер и представляет из себя  $U$ -ую характеристику, но с небольшим разворотом в сторону меньших значений тока возбуждения  $I_{*2}$ . Изменения тока возбуждения  $I_{*2}$  способствуют существенному изменению потерь активной мощности  $\Delta p_{сд}$  в диапазоне от 23,8 до 63,9 кВт, при условии, что номинальные потери активной

мощности двигателя  $\Delta p_{\text{СД.ном}}$  составляют 70,9 кВт а изменения напряжения статора  $u$  способствуют незначительному изменению потерь в диапазоне от 2,3 до 20,3 кВт. Диапазон изменения потерь активной мощности определяется как разность между величинами потерь при максимальных и минимальных значениях тока возбуждения  $I_{*2}$  и фиксированных значения напряжения обмоток статора, для изменения тока возбуждения  $I_{*2}$ , а для изменения напряжения обмоток статора  $u_*$  соответственно наоборот.

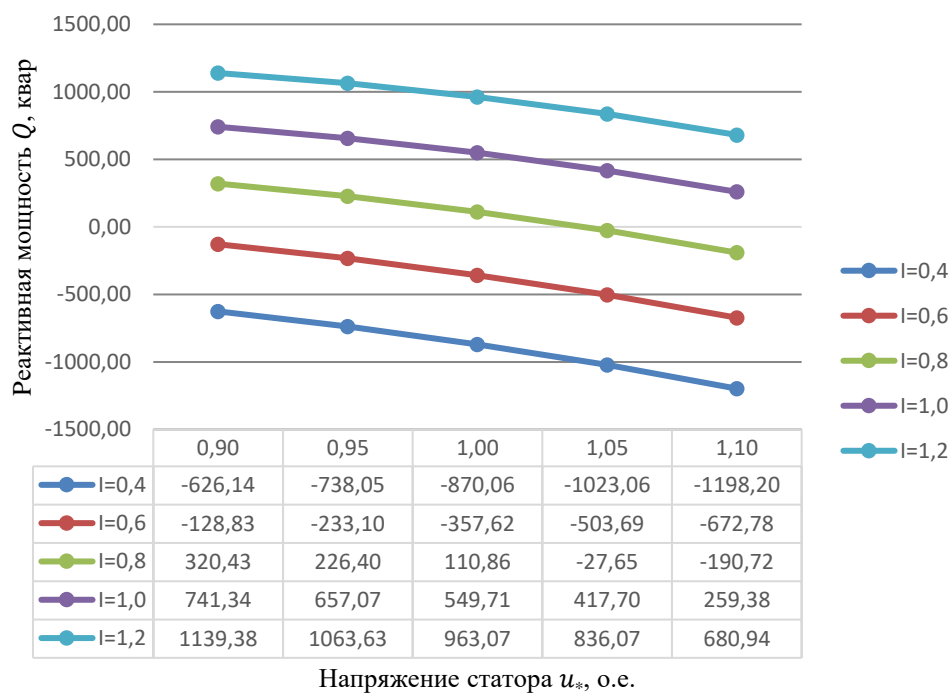


Рисунок 2.8 – Графические зависимости реактивной мощности  $Q$  от напряжения статора  $u_*$  при фиксированных значениях токов возбуждений  $I_{*2}$  ВСД

Зависимость реактивной мощности  $Q$  от напряжения статора  $u_*$  в рассматриваемом диапазоне изменений имеет практически линейный снижающийся характер, причём при увеличении значения напряжения статора  $u$  и уменьшении значения тока возбуждения  $I_{*2}$  ВСД наблюдается снижение

генерации реактивной мощности  $Q$ . Следует отметить, что режим генерации реактивной мощности  $Q$  обеспечивается значениями тока возбуждения  $I_{*2}$  выше 0,8 о.е., во всем диапазоне изменения напряжения статора  $u_*$ , и соответствует диапазону величин генерации реактивной мощности  $Q$  от 0 до 1139,38 квар или более 2,4 номинала по реактивной мощности двигателя.

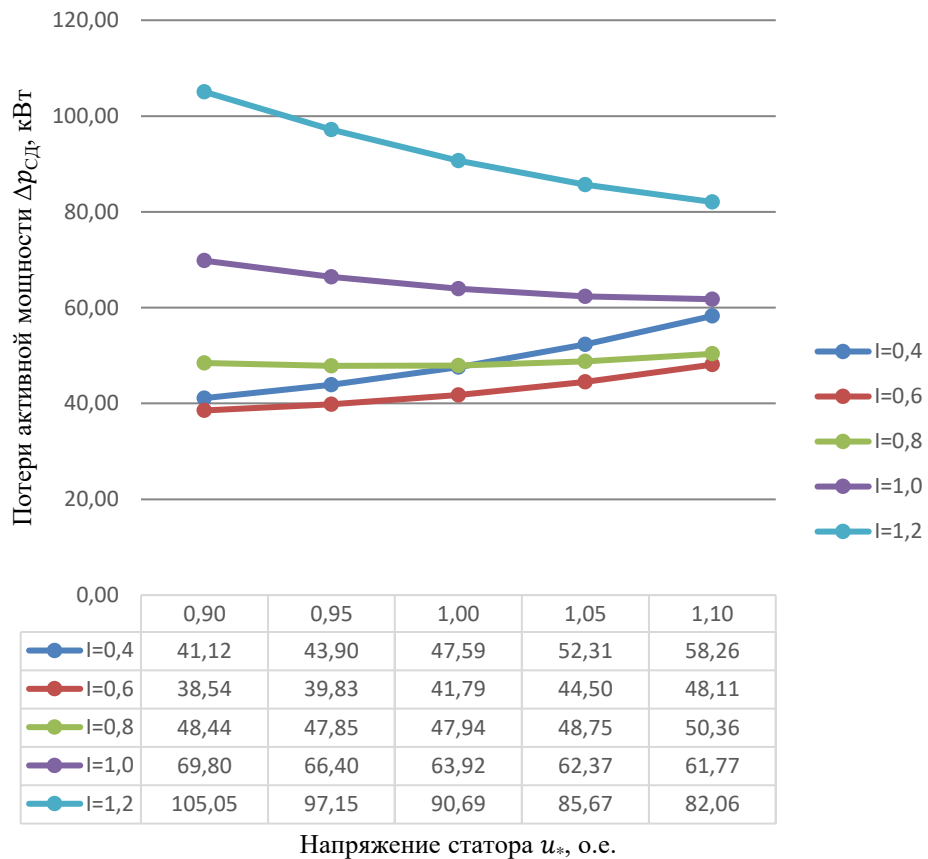


Рисунок 2.9 – Графические зависимости потерь активной мощности  $\Delta p_{сд}$  от напряжения статора  $u_*$  при фиксированных значениях токов возбуждений  $I_{*2}$  ВСД

Зависимость потерь активной мощности  $\Delta p_{сд}$  от напряжения статора  $u_*$ , в рассматриваемом диапазоне изменений, носит как нелинейный возрастающий, так и нелинейный убывающий характер. При значении тока возбуждения  $I_{*2}$  0,8 о.е. изменения потерь активной мощности  $\Delta p_{сд}$  практически линейны. В диапазоне

изменения тока возбуждения  $I_{*2}$  от 0,8 до 1,0 о.е. наблюдаются изменения потерь активной мощности  $\Delta p_{сд}$  от 2,3 до 8,0 кВт.

Для оценки регулирующих эффектов по току возбуждения и напряжению обмоток статора на рисунках 2.10 и 2.11 представлены графические зависимости мощности  $Q$  и потерь активной мощности  $\Delta p_{сд}$  от напряжения статора  $u_*$  и тока возбуждений  $I_{*2}$  ВСД соответственно.

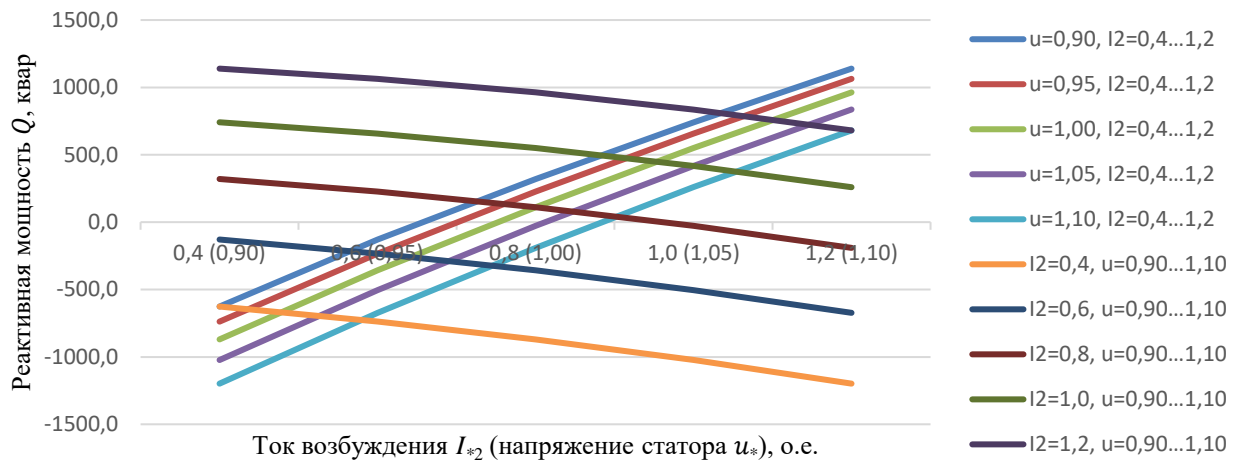


Рисунок 2.10 – Графические зависимости реактивной мощности  $Q$  от тока возбуждения  $I_{*2}$  и напряжения статора  $u_*$  ВСД

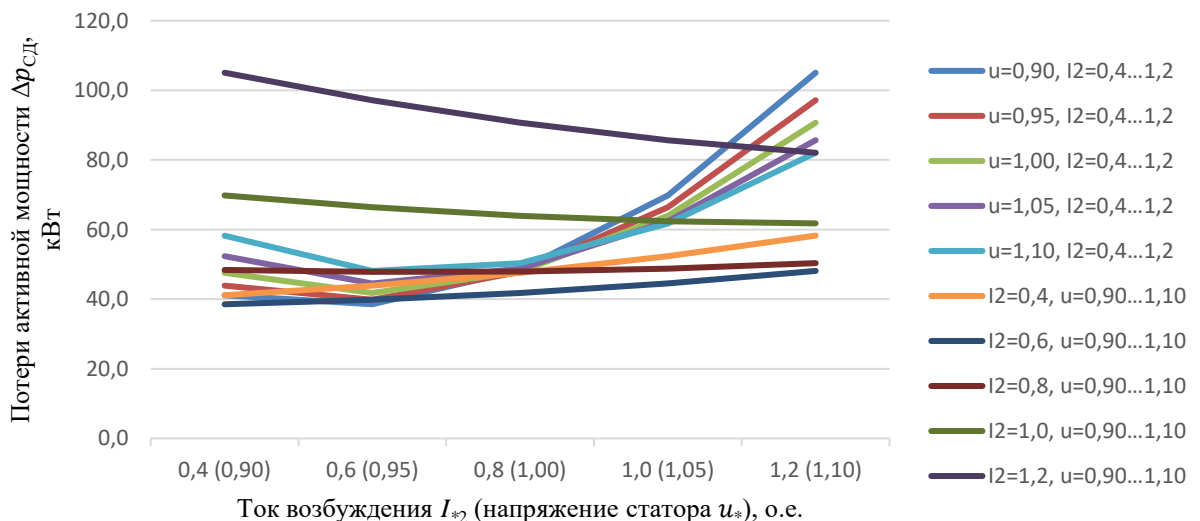


Рисунок 2.11 – Графические зависимости потерь активной мощности  $\Delta p_{сд}$  от напряжения статора  $u_*$  и тока возбуждения  $I_{*2}$  ВСД

Из рисунка 2.10 видно, что регулирующий эффект по току возбуждения ВСД имеет, по сравнению с регулирующим эффектом по напряжению статора, большую степень изменения реактивной мощности. Следует отметить, что потери активной мощности в ВСД  $\Delta p_{\text{СД}}$  при изменении напряжения обмоток статора  $u_*$  в диапазоне от 0,9 до 1,1 о.е. и тока возбуждения  $I_{*2}$  в диапазоне от 0,8 до 1,0 о.е. (рисунок 2.9, 2.11) имеют наименьшие значения, по сравнению со всеми определенными, а при токе возбуждения  $I_{*2} = 0,8$  о.е. потери практически не изменяются. Это обстоятельство говорит о том, что потери активной мощности или расхода активной мощности на производство реактивной значительно ниже при изменении напряжения статора  $u_*$ , чем при изменении тока возбуждения  $I_{*2}$ . Например, при токах возбуждения  $I_{*2}$  0,8 и 1,0 о.е. и изменении напряжения статора  $u_*$  в диапазоне от 0,9 до 1,1 о.е. затраты активной мощности на производство реактивной составляют от 0,005 до 0,017 кВт/квар, что практически соизмеримо с затратами в БСК [15, 49, 74], а если сравнивать затраты при изменении тока возбуждения  $I_{*2}$  в диапазоне от 0,8 до 1,0 о.е. и неизменных значениях напряжения статора  $u_*$ , то они составят от 0,025 до 0,05 кВт/квар.

## Выводы по главе 2

1. Разработанная в настоящей главе методика позволяет производить оценку состояния ВСД, а именно, определять величину потребляемой активной мощности из сети  $P_1$ , величину потребляемой или генерируемой реактивной мощности  $Q$ , а также величину потерь активной мощности в ВСД  $\Delta p_{\text{СД}}$ , при изменении управляющих воздействий, по току возбуждения  $I_2$  и по напряжению обмоток статора  $U_1$ , и заданном значении нагрузки на валу. Следует отметить, что данная методика позволяет моделировать режимы работы ВСД, а именно, определять адаптивную реакцию на различные отклонения параметров режима работы системы электроснабжения в режиме реального времени.

2. Созданный на основании разработанной методики алгоритм реализуется программой для ЭВМ (№2021680084 от 07.12.2021). Программа позволяет производить оценку параметров состояния заданного режима ВСД, а также моделировать множество режимов для исследования регулирующих эффектов по управляющим воздействиям.

3. Исследование состояний ВСД показало, что реактивная мощность  $Q$  и потери активной мощности  $\Delta p_{\text{СД}}$  изменяются в достаточно широких пределах, не только при изменении тока возбуждения [54], но и при изменении напряжения обмоток статора, причём характер зависимостей по реактивной мощности соответствует экспериментально полученным зависимостям представленным в [4]. Следовательно, ВСД обладает такими режимами генерации реактивной мощности, при которых потери активной мощности могут значительно отличаться в зависимости от управляющего воздействия.

### 3. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ УРОВНЯ ПОТЕРЬ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

#### 3.1. Обобщенная структура системы электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами

Системы электроснабжения промышленных предприятий со значительной установленной мощности ВСД имеют некоторую схожесть по своим структурам [1, 3, 12, 29, 35, 40, 60, 73, 75, 80, 84, 88, 90], в частности, наличие в системах электроснабжения однопольных элементов, таких как трансформаторы, обеспечивающие регулирование напряжения под нагрузкой (РПН) и устанавливаемые на главной понизительной подстанции (ГПП); различные участки токопроводов между узлами систем электроснабжения и групп электроприемников с активными элементами. На этом основании целесообразно рассматривать систему электроснабжения, имеющую некоторую обобщенную структуру. В системах электроснабжения промышленных предприятий, как правило, применяются схемы электрических соединений на ГПП типа 4Н [41], когда электроснабжение осуществляется через 2 блока (линия – трансформатор). Данная схема позволяет в нормальном режиме эксплуатации ГПП обеспечить питание от двух независимых источников, что позволяет каждый блок рассматривать в отдельности, то есть при различных не нормальных режимах работы ГПП будет изменяться только конфигурация электрической схемы питания электроприемников.

Обобщенная структура системы электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами представлена на рисунке 3.1 и включает в себя внешнюю энергосистему:  $GS$  – источник бесконечной мощности,  $W_0$  – линию электропередач (ЛЭП) внешней энергосистемы (система внешнего электроснабжения); систему внутреннего электроснабжения:  $T$  – трансформатор с РПН, установленный на ГПП,  $W_i$ ,  $W_j$  – участки токопровода системы



электрообеспечения ( $L$ –количество радиальных токопроводов,  $F$ –количество магистральных токопроводов); электроприемники: группа однотипных ВД (активные элементы) ( $M$ –количество ВД в группе) и комплексная нагрузка [71].

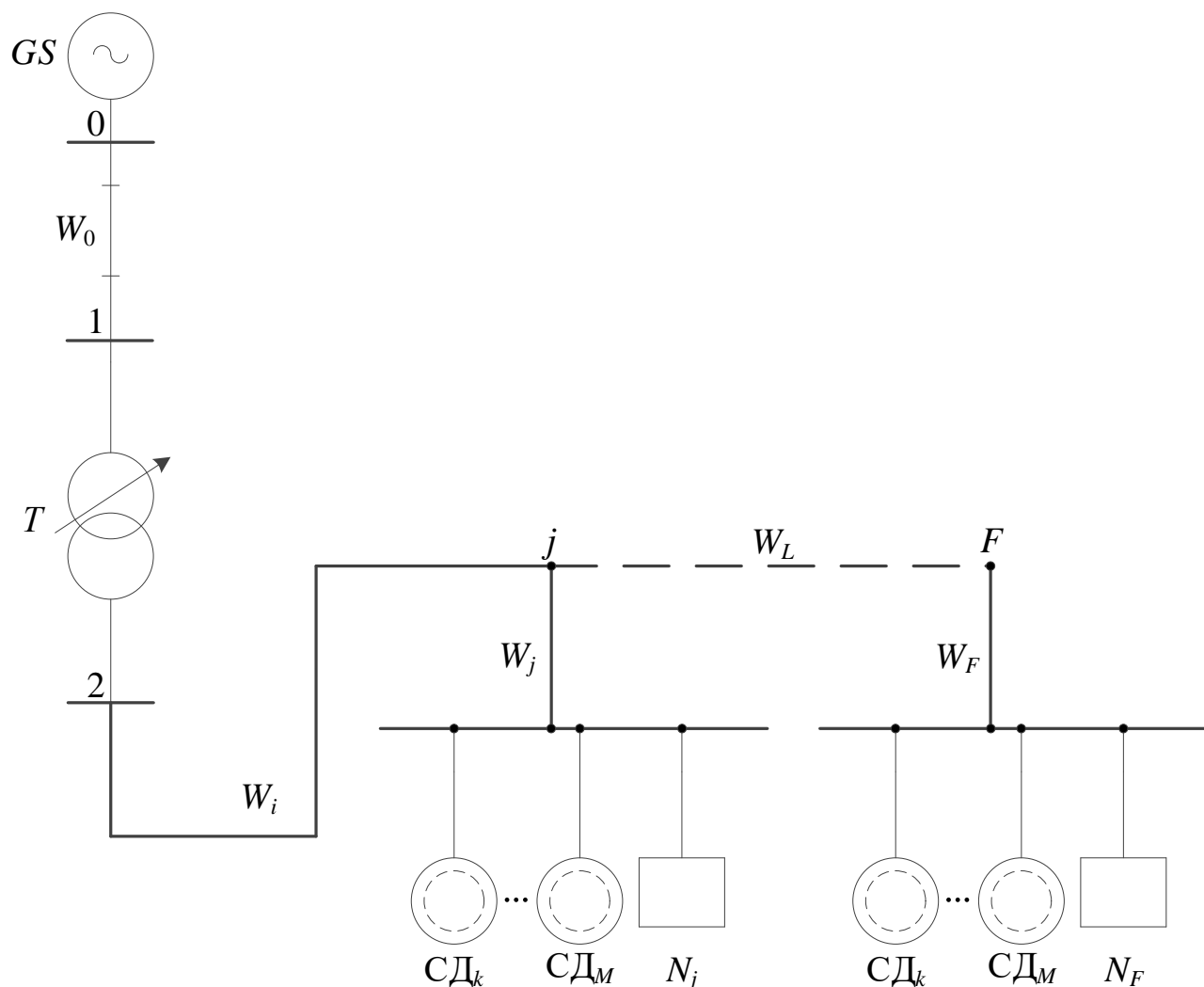


Рисунок 3.1 – Структура обобщенной системы электрообеспечения промышленного предприятия с активными элементами

Для разработки математической модели обобщенной системы электрообеспечения промышленного предприятия с активными элементами необходимо создать расчетную схему замещения [9, 57]. Расчетная схема замещения обобщенной системы электрообеспечения промышленного предприятия с активными элементами представлена на рисунке 3.2.

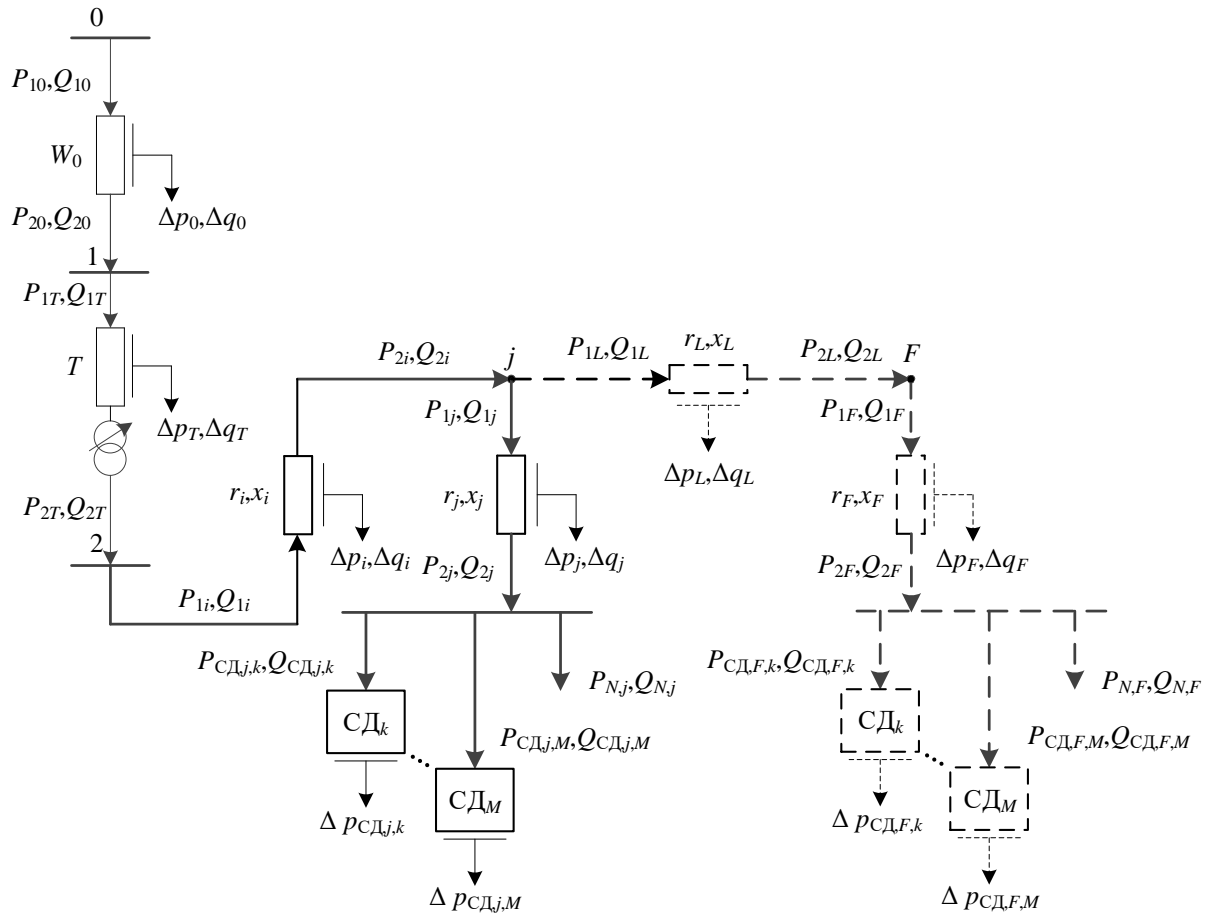


Рисунок 3.2 – Расчетная схема замещения обобщенной системы электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами

Создание расчётной схемы рассматриваемой обобщенной системы электроснабжения основано на разбиении участков системы на элементы, причём каждый элемент имеет свои характеристики, активные и реактивные сопротивления, потери активной  $\Delta p$  и реактивной мощности  $\Delta q$ . Так, например, участок 0-1 представлен элементом  $W_0$ , на входе которого, в точке 0, имеется напряжение центра питания, и который имеет входной ток со своими параметрами (величина и сдвиг по фазе относительно напряжения, а также содержание высших гармоник, которые в ряде случаев можно не учитывать) [17]. Естественно, на выходе, в точке 1, будет другое напряжение и другой сдвиг по фазе между током и напряжением. Таким образом, значение полной мощности на входе, в точке 0, будет отличаться от значения полной мощности в точке 1, на выходе элемента. Разница между активной и реактивной мощностями обозначена

символами  $\Delta p_0$  и  $\Delta q_0$ . Аналогичным образом представлены другие элементы. Активная и реактивная мощности, которые потребляются ВСД, обозначены как  $P_{CD,j,k}$  и  $Q_{CD,j,k}$ . Соответственно, свой индекс имеет каждый элемент, где установлена группа ВСД. Узлы системы электроснабжения  $j$  соединены токопроводами со своими сопротивлениями, которые также отражены на схеме в виде активно-индуктивного сопротивления с соответствующим индексом. Пересчёт токов и напряжений между точками 1 и 2 осуществляется по правилам схемы замещения идеального трансформатора [87].

### 3.2. Математическая модель обобщенной системы электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами

Математическая модель обобщенной системы электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами разработана на основании расчётной схемы (рисунок 3.2) и представлена в следующем виде [71]:

$$M_{\text{ОСЭПП}} = \begin{cases} M_T \\ M_{w,i(j)}, (i = 0 \dots L; j = 1 \dots F) \\ M_{G,j}, (j = 1 \dots F) \\ M_{CD,j,k}, (k = 1 \dots M) \end{cases} . \quad (3.1)$$

где  $M_T$  – математическая модель трансформатора с РПН;

$M_{w,i(j)}$  – математическая модель  $i$ -го ( $j$ -го) элемента системы электроснабжения промышленного предприятия;

$i$  – порядковый номер элемента системы электроснабжения промышленного предприятия;

$L$  – количество элементов системы электроснабжения промышленного предприятия, шт.;

$M_{G,j}$  – математическая модель  $j$ -ой группы электроприемников;

$j$  – порядковый номер группы электроприемников;

$F$  – количество групп электроприемников системы электроснабжения промышленного предприятия, шт.;

$M_{сД,j,k}$  – математическая модель  $k$ -го ВСД  $j$ -ой группы электроприемников;

$k$  – порядковый номер ВСД  $j$ -ой группы электроприемников;

$M$  – количество ВСД  $j$ -ой группы электроприемников.

Рассмотрим составляющие математической модели обобщённой системы электроснабжения промышленного предприятия.

1) Математическая модель трансформатора с РПН,  $M_T$  [52, 87]:

$$M_T = \left\{ \begin{array}{l} \Delta U = \frac{P_{2T} \cdot r_T + Q_{2T} \cdot x_T}{k_T \cdot U_2} \cdot 10^{-3} \\ U_1 = k_T \cdot U_2 + \Delta U \\ I_2 = \frac{\sqrt{P_{2T}^2 + Q_{2T}^2}}{\sqrt{3} \cdot U_2} \\ \Delta p_T = G \cdot U_1^2 \cdot 10^{-3} + 3 \cdot \frac{I_2^2}{k_T^2} \cdot r \cdot 10^{-3} \\ \Delta q_T = B \cdot U_1^2 \cdot 10^{-3} + 3 \cdot \frac{I_2^2}{k_T^2} \cdot x \cdot 10^{-3} \\ P_{1T} = P_{2T} + \Delta p_T \\ Q_{1T} = Q_{2T} + \Delta q_T \\ I_1 = \frac{\sqrt{P_{1T}^2 + Q_{1T}^2}}{\sqrt{3} \cdot U_1} \\ k_T = \varphi(R) \end{array} \right. \quad (3.2)$$

где  $P_1$  – активная мощность первичной обмотки трансформатора, кВт;

$Q_1$  – реактивная мощность первичной обмотки трансформатора, квар;

$U_1$  – напряжение первичной обмотки трансформатора, кВ;

$I_1$  – ток первичной обмотки трансформатора, А;

$P_2$  – активная мощность вторичной обмотки трансформатора, кВт;

$Q_2$  – реактивная мощность вторичной обмотки трансформатора, квар;

$U_2$  – напряжение вторичной обмотки трансформатора, кВ;

$I_2$  – ток вторичной обмотки трансформатора, А;

$r$  – активное сопротивление трансформатора, Ом;

$x$  – реактивное сопротивление трансформатора, Ом;

$G$  – активная проводимость, приведенная к напряжению первичной обмотки трансформатора, См;

$B$  – реактивная проводимость, приведенная к напряжению первичной обмотки трансформатора, См;

$\Delta U$  – потери напряжения в трансформаторе с РПН, кВ;

$\Delta p_T$  – потери активной мощности в трансформаторе с РПН, кВт;

$\Delta q_T$  – потери реактивной мощности в трансформаторе с РПН, квар;

$k_T$  – коэффициент трансформации трансформатора с РПН, о. е.;

$R$  – порядковый номер регулировочной ступени трансформатора с РПН.

2) Математическая модель  $i$ -го ( $j$ -го) элемента системы электроснабжения промышленного предприятия,  $M_{w,i(j)}$  (участка токопровода,  $W$ ) [16]:

$$M_{w,i(j)} = \left\{ \begin{array}{l} \Delta U_{i(j)} = \frac{P_{2i(j)} \cdot r_{i(j)} + Q_{2i(j)} \cdot x_{i(j)}}{U_{2i(j)}} \cdot 10^{-3} \\ U_{1i(j)} = U_{2i(j)} + \Delta U_{i(j)} \\ I_{i(j)} = \frac{\sqrt{P_{2i(j)}^2 + Q_{2i(j)}^2}}{\sqrt{3} \cdot U_{2i(j)}} \\ \Delta p_{i(j)} = 3 \cdot I_{i(j)}^2 \cdot r_{i(j)} \cdot 10^{-3} \\ \Delta q_{i(j)} = 3 \cdot I_{i(j)}^2 \cdot x_{i(j)} \cdot 10^{-3} \\ P_{1i(j)} = P_{2i(j)} + \Delta p_{i(j)} \\ Q_{1i(j)} = Q_{2i(j)} + \Delta q_{i(j)} \end{array} \right. \quad (3.3)$$

где  $P_{1i(j)}$  – активная мощность в начале  $i$ -го ( $j$ -го) элемента, кВт;

$Q_{1i(j)}$  – реактивная мощность в начале  $i$ -го ( $j$ -го) элемента, квар;

$U_{1i(j)}$  – напряжение в начале  $i$ -го ( $j$ -го) элемента, кВ;

$P_{2i(j)}$  – активная мощность в конце  $i$ -го ( $j$ -го) элемента, кВт;

$Q_{2i(j)}$  – реактивная мощность в конце  $i$ -го ( $j$ -го) элемента, квар;

$U_{2i(j)}$  – напряжение в конце  $i$ -го ( $j$ -го) элемента, кВ;

$r_{i(j)}$  – активное сопротивление  $i$ -го ( $j$ -го) элемента, Ом;

$x_{i(j)}$  – реактивное сопротивление  $i$ -го ( $j$ -го) элемента, Ом;

$\Delta U_{i(j)}$  – потери напряжения  $i$ -го ( $j$ -го) элемента, кВ;

$\Delta p_{i(j)}$  – потери активной мощности  $i$ -го ( $j$ -го) элемента, кВт;

$\Delta q_{i(j)}$  – потери реактивной мощности  $i$ -го ( $j$ -го) элемента, кВт.

3) Математическая модель  $j$ -ой группы электроприемников,  $M_{G,j}$  (комплексная нагрузка, ВСД) [94]:

$$M_{G,j} = \begin{cases} P_{G,j} = \sum_{k=1}^M P_{CD,j,k} + P_{N,j} \\ Q_{G,j} = \sum_{k=1}^M Q_{CD,j,k} + Q_{N,j} \\ \Delta p_{CD,j} = \sum_{k=1}^M \Delta p_{CD,j,k} \end{cases} \quad (3.4)$$

где  $P_{G,j}$  – активная мощность  $j$ -ой группы электроприемников, кВт;

$Q_{G,j}$  – реактивная мощность  $j$ -ой группы электроприемников, квар;

$P_{CD,j,k}$  – активная мощность  $k$ -го ВСД, кВт;

$Q_{CD,j,k}$  – реактивная мощность  $k$ -го ВСД, квар;

$P_{N,j}$  – активная мощность комплексной нагрузки  $j$ -ой группы электроприемников, кВт;

$Q_{N,j}$  – реактивная мощность комплексной нагрузки  $j$ -ой группы электроприемников, квар;

$\Delta p_{CD,j}$  – суммарные потери активной мощности в ВСД,  $j$ -ой группы электроприемников, кВт;

$\Delta p_{CD,j,k}$  – потери активной мощности в  $k$ -ом ВСД,  $j$ -ой группы электроприемников, кВт.

4) Математическая модель  $k$ -го ВСД,  $M_{CD,j,k}$ ,  $j$ -ой группы электроприемников [11]:

$$M_{CD,j,k} = \left\{ \begin{array}{l} P_{CD,j,k} = \beta_{s,j,k} \cdot S_{H,j,k} \\ Q_{CD,j,k} = \alpha_{s,j,k} \cdot S_{H,j,k} \\ \varepsilon_{*0,j,k}^2 = \varepsilon_{*0H,j,k}^2 \cdot I_{*2,j,k}^2 \\ \varepsilon_{*0,j,k}^2 = \varepsilon_{*j,k}^2 + (\Delta\varepsilon_{*j,k})^2 + 2 \cdot \varepsilon_{*j,k} \cdot \Delta\varepsilon_{*j,k} \cdot \cos(\theta_{j,k} - \sigma_{p,j,k}) \\ \varepsilon_{*j,k} = \frac{x_{d,j,k} \cdot \beta_{s,j,k} \cdot \sin \theta_{j,k}}{u_{*CD,j,k}} + \\ + \frac{(u_{*CD,j,k}^2 + x_{d,j,k} \cdot \alpha_{s,j,k}) \cdot \cos \theta_{j,k}}{u_{*CD,j,k}} \\ \Delta\varepsilon_{*j,k} = 2,81 - 3,22 \cdot \sqrt{0,98 - 0,72 \cdot \varepsilon_{*p,j,k} - \varepsilon_{*p,j,k}} \\ \varepsilon_{*p,j,k} = \frac{u_{*CD,j,k}^2 + x_{p,j,k} \cdot \alpha_{s,j,k}}{u_{*CD,j,k} \cdot \cos \sigma_{p,j,k}} \\ \sigma_{p,j,k} = \arctg \left( \frac{x_{p,j,k} \cdot \beta_{s,j,k}}{u_{*CD,j,k}^2 + x_{p,j,k} \cdot \alpha_{s,j,k}} \right) \\ \theta_{j,k} = \arctg \left( \frac{x_{q,j,k} \cdot \beta_{s,j,k}}{u_{*CD,j,k}^2 + x_{q,j,k} \cdot \alpha_{s,j,k}} \right) \\ P_{CD,j,k} = m_{j,k} \cdot P_{2H,j,k} + \Delta p_{0,j,k} + \Delta p_{1,j,k} + \Delta p_{3,j,k} \\ r_{*1,j,k} = \frac{235 + u_{0,j,k} + \tau_{1H,j,k} \cdot I_{*1,j,k}^2}{235 + u_{0,j,k} + \tau_{1H,j,k}} \\ r_{*2,j,k} = \frac{235 + u_{0,j,k} + \tau_{2H,j,k} \cdot I_{*2,j,k}^2}{235 + u_{0,j,k} + \tau_{2H,j,k}} \\ \Delta p_{1,j,k} = \Delta p_{1H,j,k} \cdot r_{*1,j,k} \cdot I_{*1,j,k}^2 \\ \Delta p_{2,j,k} = \Delta p_{2H,j,k} \cdot r_{*2,j,k} \cdot I_{*2,j,k}^2 \\ \Delta p_{3,j,k} = \Delta p_{3H,j,k} \cdot \frac{x_{\sigma,j,k}^2 \cdot I_{*1,j,k}^2 + 2 \cdot x_{\sigma,j,k} \cdot \alpha_{s,j,k} + u_{*CD,j,k}^2}{x_{\sigma,j,k}^2 + 2 \cdot x_{\sigma,j,k} \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{H,j,k}} + 1} \\ \Delta p_{CD,j,k} = \Delta p_{0,j,k} + \Delta p_{1,j,k} + \Delta p_{2,j,k} + \Delta p_{3,j,k} \end{array} \right. \quad (3.5)$$

где  $\alpha_{s,j,k}$  – отношение реактивной мощности к полной мощности  $k$ -го ВСД, о. е.;

$S_{H,j,k}$  – номинальное значение полной мощности  $k$ -го ВСД, кВ·А;

$\beta_{s,j,k}$  – отношение активной мощности, потребляемой из сети, к полной мощности  $k$ -го ВСД, о. е.;

- $u_{*CD,j,k}$  – относительное по отношению к номинальному значение напряжения обмотки статора  $k$ -го ВСД, о. е.;
- $I_{*1,j,k}$  – относительное по отношению к номинальному значение тока статора  $k$ -го ВСД, о. е.;
- $I_{*2,j,k}$  – относительное по отношению к номинальному значение тока возбуждения  $k$ -го ВСД, о. е.
- $\varepsilon_{*0,j,k}$  – относительное значение ЭДС возбуждения с учетом изменения насыщения магнитной цепи  $k$ -го ВСД, о. е.;
- $\varepsilon_{*0н,j,k}$  – относительное номинальное значение ЭДС возбуждения с учетом изменения насыщения магнитной цепи  $k$ -го ВСД, о. е.;
- $\varepsilon_{*j,k}$  – относительное значение ЭДС возбуждения без учета изменения насыщения магнитной цепи  $k$ -го ВСД, о. е.;
- $\Delta\varepsilon_{*j,k}$  – относительное значение добавочной ЭДС  $k$ -го ВСД, зависящей от степени насыщения магнитной цепи, о. е.;
- $\theta_{j,k}$  – угол сдвига между ЭДС возбуждения и напряжением статора  $k$ -го ВСД, без учета изменения насыщения магнитной цепи, рад;
- $\sigma_{p,j,k}$  – угол сдвига между ЭДС Потье и напряжением статора  $k$ -го ВСД, рад;
- $x_{d,j,k}$  – синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси  $k$ -го ВСД, о. е.;
- $\varepsilon_{*p,j,k}$  – относительное значение ЭДС Потье  $k$ -го ВСД, о. е.;
- $x_{p,j,k}$  – индуктивное сопротивление Потье  $k$ -го ВСД, о. е.;
- $x_{q,j,k}$  – синхронное индуктивное сопротивление по поперечной оси  $k$ -го ВСД, о. е.;
- $m_{j,k}$  – относительное значение момента на валу  $k$ -го ВСД, о.е.;
- $P_{2н,j,k}$  – номинальная механическая мощность на валу  $k$ -го ВСД, кВт;
- $\Delta p_{0,j,k}$  – механические потери в  $k$ -ом ВСД, кВт;
- $\Delta p_{1,j,k}$  – потери активной мощности в обмотке статора  $k$ -го ВСД, кВт;
- $\Delta p_{3,j,k}$  – потери активной мощности в стали магнитопровода  $k$ -го ВСД, кВт;



$U_{0,j,k}$  – температура охлаждающей среды  $k$ -го ВСД, °С;

$\tau_{1н,j,k}$  – номинальное значение превышения температуры обмотки статора над температурой охлаждающей среды  $k$ -го ВСД, °С;

$\tau_{2н,j,k}$  – номинальное значение превышения температуры обмотки возбуждения над температурой охлаждающей среды  $k$ -го ВСД, °С;

$r_{*1,j,k}$  – относительное по отношению к номинальному значению активного сопротивления фазы статора  $k$ -го ВСД, о. е.;

$r_{*2,j,k}$  – относительное по отношению к номинальному значению активного сопротивления обмотки возбуждения  $k$ -го ВСД, о. е.;

$\Delta p_{1н,j,k}$  – номинальное значение потерь активной мощности в обмотке статора  $k$ -го ВСД, кВт;

$\Delta p_{2,j,k}$  – потери активной мощности в обмотке возбуждения  $k$ -го ВСД, кВт;

$\Delta p_{2н,j,k}$  – номинальное значение потерь активной мощности в обмотке возбуждения  $k$ -го ВСД, кВт;

$\Delta p_{3н,j,k}$  – номинальное значение потерь активной мощности в стали магнитопровода  $k$ -го ВСД, кВт;

$x_{\sigma,j,k}$  – индуктивное сопротивление рассеяния  $k$ -го ВСД, о. е.;

$\cos \varphi_{н,j,k}$  – номинальный коэффициент мощности  $k$ -го ВСД, о. е.

Таким образом, получена математическая модель, представляющая собой совокупность уравнений для решения задачи оценки уровня потерь активной мощности. Для оценки уровня потерь активной мощности в системе электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами, используя разработанную математическую модель обобщенной системы, необходимо воспользоваться методикой [23, 46, 92] и на её основе разработать алгоритм для решения поставленной задачи.

### 3.3. Алгоритм для решения задачи оценки уровня потерь активной мощности

Решение задачи оценки уровня потерь активной мощности в обобщенной системе электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами сводится к определению параметров состояния режима работы, а именно, потокораспределений, потерь активной и реактивной мощности в элементах и напряжений в узлах системы электроснабжения зависящих от управляющих воздействий [70].

Оценка уровня потерь активной мощности в системе электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами производится при заданных значениях токов возбуждения групп однотипных ВСД и коэффициента трансформации трансформатора с РПН, установленного на ГПП [24, 98].

Коэффициент трансформации трансформатора с РПН зависит от положения регулировочной ступени и определяется [23]:

$$k_T = \frac{U_{1.\text{НОМ}} + (10 - R) \cdot \frac{\Delta k_T}{100} \cdot U_{1.\text{НОМ}}}{U_{2.\text{НОМ}}}. \quad (3.6)$$

где  $U_{1.\text{НОМ}}$  – номинальное высшее напряжение трансформатора с РПН, кВ;

$U_{2.\text{НОМ}}$  – номинальное низшее напряжение трансформатора с РПН, кВ;

$\Delta k_T$  – шаг коэффициента трансформации, %.

Относительное значение тока возбуждения группы однотипных ВСД  $j$ -ой группы электроприемников определяется:

$$I_{*2,j} = I_{*2,j,k} = \dots = I_{*2,j,M}. \quad (3.7)$$

Выражение (3.7) показывает, что токи возбуждения группы однотипных ВСД  $j$ -ой группы электроприемников одинаковые по величине. Это условие позволяет ограничиться количеством ВСД в узле нагрузки с одинаковыми параметрами режима работы.

Оценка состояний осуществляется на основе математической модели (3.1) с применением методики расчета установившегося режима разомкнутой электрической сети [23, 46, 92] по заданным значениям нагрузок и напряжению центра питания. Методика основывается на итерационных расчетах, позволяющих уточнять параметры установившегося режима до достижения заданной точности. Как известно, метод итераций является разновидностью численных методов решения системы алгебраических уравнений [66]. При использовании такого метода находится приближённое значение величины, которое используется для нахождения другого, более точного значения.

Для итерационных расчетов необходимо задаться начальным приближением напряжений (номинальное линейное напряжение) [23, 46, 92] во всех узлах системы электроснабжения. Начальное приближение напряжения в центре питания задается величиной  $U_0^{(0)}$ , а в других узлах по выражениям (3.6-3.8). Верхний индекс  $U_0^{(y)}$ , заключенный в скобки, обозначает порядковый номер итерации, где 0 – номер начальной (нулевой) итерации. Обозначение узлов системы электроснабжения представлено на рисунке 3.2.

$$U_1^{(0)} = U_0^{(0)} = U_{GS}, \quad (3.8)$$

где  $U_{GS}$  – напряжение центра питания, кВ.

$$U_2^{(0)} = \frac{U_1^{(0)}}{k_T}, \text{ где } k_T = \varphi(R), \quad (3.9)$$

$$U_{j+2}^{(0)} = U_{СД,j}^{(0)} = U_2^{(0)}, \text{ где } j = 1 \dots F. \quad (3.10)$$

Далее производится расчет потокораспределений, потерь активной и реактивной мощности в элементах системы электроснабжения.

Для расчета потокораспределений и потерь активной мощности в ВСД по (3.5) и методике, изложенной в главе 2, при заданных соответствующих значениях  $U_{СД,j}^{(y)}$  примем, что  $m_{j,k}$  для всех однотипных ВСД  $j$ -ой группы электроприемников одинаковый. Тогда:

$$m_j = m_{j,k} = \dots = m_{j,M}, \quad (3.11)$$

На рисунке 3.3 показана функциональная схема системы электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами. Для удобного и точного расчёта схема разбита на элементы: «ЛЭП внешней энергосистемы», «Трансформатор с РПН», «Участок магистрального токопровода» и т.д. На входе каждого элемента имеется входное напряжение – в частности, на входе ЛЭП внешней энергосистемы имеется напряжение  $U_0$ , а на выходе –  $U_1$ . Поскольку на каждом элементе имеются потери мощности, то при определенном токе выходное напряжение будет отличаться от входного. Элементы на схеме, соединены последовательно и (или) параллельно в зависимости от реальных соединений между участками.

Для  $j$ -ой группы однотипных ВСД запишем выражения суммарной активной, реактивной мощностей и суммарных потерь активной мощности:

$$P_{СД,j} = n \cdot P_{СД,j,k}, \quad (3.12)$$

где  $n$  – количество однотипных ВСД  $j$ -ой группы электроприемников, шт.

$$Q_{CD,j} = n \cdot Q_{CD,j,k}, \quad (3.13)$$

$$\Delta p_{CD,j} = n \cdot \Delta p_{CD,j,k}. \quad (3.14)$$

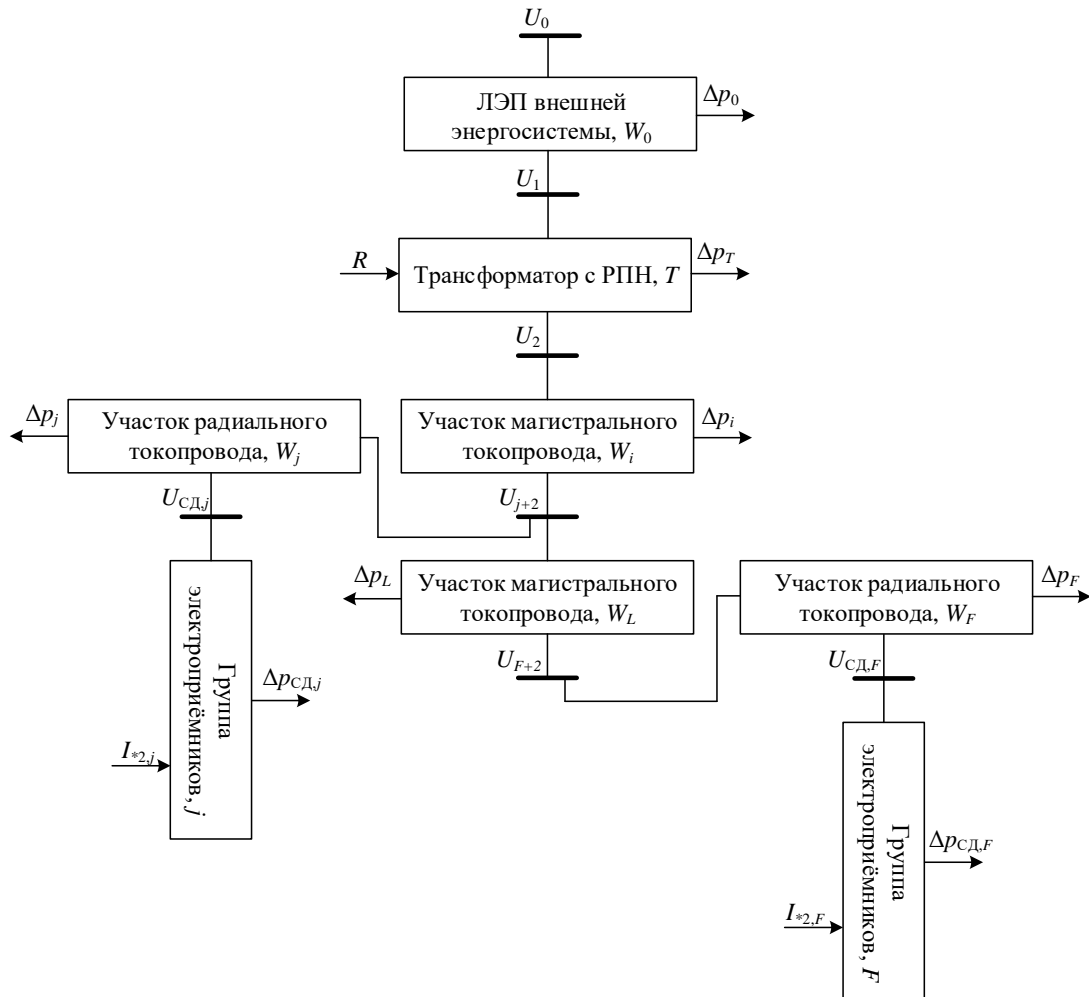


Рисунок 3.3 – Функциональная схема системы электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами

Для расчета потокораспределений, потерь активной и реактивной мощности в  $j$ -м радиальном токопроводе системы электроснабжения необходимо по (3.4) определить  $P_{G,j}$  и  $Q_{G,j}$ , а затем на основании выражений (3.15-4.16) по (3.3) при заданных соответствующих значениях  $U_{CD,j}^{(y)}$  определить  $I_j$ ,  $\Delta p_j$ ,  $\Delta q_j$ ,  $P_{1j}$  и  $Q_{1j}$ .

$$P_{2j} = P_{G,j}, \quad (3.15)$$

$$Q_{2j} = Q_{G,j}. \quad (3.16)$$

Для расчета потокораспределений, потерь активной и реактивной мощности в  $i$ -м участке магистрального токопровода системы электроснабжения необходимо по (4.3) на основании выражений (3.17-3.18), при заданных соответствующих значениях  $U_{j+2}^{(y)}$ , определить  $I_i$ ,  $\Delta p_i$ ,  $\Delta q_i$ ,  $P_{1i}$  и  $Q_{1i}$ .

$$P_{2i} = P_{1j} + P_{1(i+1)}, \quad (3.17)$$

$$Q_{2i} = Q_{1j} + Q_{1(i+1)} \quad (3.18)$$

Для расчета потокораспределений, потерь активной и реактивной мощности в трансформаторе с РПН необходимо по (3.2) на основании выражений (3.19-3.20) при заданном значении  $U_2^{(y)}$  определить  $I_2$ ,  $\Delta p_T$ ,  $\Delta q_T$ ,  $P_{1T}$  и  $Q_{1T}$ .

$$P_{2T} = P_{1i}, \text{ где } i = 1, \quad (3.19)$$

$$Q_{2T} = Q_{1i}, \text{ где } i = 1. \quad (3.20)$$

Для расчета потокораспределений, потерь активной и реактивной мощности в ЛЭП внешней энергосистемы необходимо по (3.3) на основании выражений (3.21-3.22) при заданном значении  $U_1^{(y)}$  определить  $I_0$ ,  $\Delta p_0$ ,  $\Delta q_0$ ,  $P_{10}$  и  $Q_{10}$ .

$$P_{20} = P_{1T}, \quad (3.21)$$

$$Q_{20} = Q_{1T}. \quad (3.22)$$

На этом заканчивается так называемый прямой ход итерации [92], в котором приближенно рассчитано потокораспределение в элементах системы электроснабжения. Следующие действие – это обратный ход итерации [92], направленный на уточнение напряжений в узлах системы электроснабжения.

Для уточнения напряжений в узлах системы электроснабжения необходимо воспользоваться выражениями [92], тогда:

Падение напряжения в узле 1:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1^{(y)} &= U_0^{(0)} - \Delta \dot{U}_{01}^{(y)} = U_0^{(0)} - \Delta U_{01}^{(y)} - j \delta U_{01}^{(y)} = \\ &= U_0^{(0)} - \frac{P_{10}^{(y)} \cdot r_0 + Q_{10}^{(y)} \cdot x_0}{U_0^{(0)}} - j \frac{P_{10}^{(y)} \cdot x_0 - Q_{10}^{(y)} \cdot r_0}{U_0^{(0)}}. \end{aligned} \quad (3.23)$$

где  $\Delta \dot{U}_{01}^{(y)}$  – падение напряжения в линии электропередач внешней энергосистемы, кВ;

$\Delta U_{01}^{(y)}$  – продольная составляющая падения напряжения в линии электропередач внешней энергосистемы, кВ;

$\delta U_{01}^{(y)}$  – поперечная составляющая падения напряжения в линии электропередач внешней энергосистемы, кВ.

Модуль напряжения в узле 1:

$$U_1^{(y)} = \left| \dot{U}_1^{(y)} \right| = \sqrt{\left( U_0^{(0)} - \Delta U_{01}^{(y)} \right)^2 + \left( \delta U_{01}^{(y)} \right)^2}. \quad (3.24)$$

Падение напряжения в узле 2:

$$\begin{aligned} \dot{U}_2^{(y)} &= \frac{U_1^{(y)} - \Delta \dot{U}_{12}^{(y)}}{k_T} = \frac{U_1^{(y)} - \Delta U_{12}^{(y)} - j\delta U_{12}^{(y)}}{k_T} = \\ &= \frac{U_1^{(y)}}{k_T} - \frac{P_{1T}^{(y)} \cdot r_T + Q_{1T}^{(y)} \cdot x_T}{U_1^{(y)} \cdot k_T} - j \frac{P_{1T}^{(y)} \cdot x_T - Q_{1T}^{(y)} \cdot r_T}{U_1^{(y)} \cdot k_T} \end{aligned} \quad (3.25)$$

где  $\Delta \dot{U}_{12}^{(y)}$  – падение напряжения на в трансформаторе с РНП, кВ;

$\Delta U_{12}^{(y)}$  – продольная составляющая падения напряжения в трансформаторе с РПН, кВ;

$\delta U_{12}^{(y)}$  – поперечная составляющая падения напряжения в трансформаторе с РПН, кВ.

Модуль напряжения в узле 2:

$$U_2^{(y)} = |\dot{U}_2^{(y)}| = \sqrt{\left(\frac{U_1^{(y)} - \Delta U_{12}^{(y)}}{k_T}\right)^2 + \left(\frac{\delta U_{12}^{(y)}}{k_T}\right)^2}. \quad (3.26)$$

Падение напряжения в узле  $j+2$ :

$$\begin{aligned} \dot{U}_{j+2}^{(y)} &= U_{j+1}^{(y)} - \Delta \dot{U}_{(j+1)(j+2)}^{(y)} = U_{j+1}^{(y)} - \Delta U_{(j+1)(j+2)}^{(y)} - j\delta U_{(j+1)(j+2)}^{(y)} = \\ &= U_{j+1}^{(y)} - \frac{P_{1i}^{(y)} \cdot r_i + Q_{1i}^{(y)} \cdot x_i}{U_{j+1}^{(y)}} - j \frac{P_{1i}^{(y)} \cdot x_i - Q_{1i}^{(y)} \cdot r_i}{U_{j+1}^{(y)}} \end{aligned} \quad (3.27)$$

где  $\Delta \dot{U}_{(j+1)(j+2)}^{(y)}$  – падение напряжения в  $i$ -м участке магистрального токопровода системы электроснабжения, кВ;



$\Delta U_{(j+1)(j+2)}^{(y)}$  – продольная составляющая падения напряжения  $i$ -м участке магистрального токопровода системы электроснабжения, кВ;

$\delta U_{(j+1)(j+2)}^{(y)}$  – поперечная составляющая падения напряжения в  $i$ -м участке магистрального токопровода системы электроснабжения, кВ.

Модуль напряжения в узле  $j+2$ :

$$U_{j+2}^{(y)} = \left| \dot{U}_{j+2}^{(y)} \right| = \sqrt{\left( U_{j+1}^{(y)} - \Delta U_{(j+1)(j+2)}^{(y)} \right)^2 + \left( \delta U_{(j+1)(j+2)}^{(y)} \right)^2}. \quad (3.28)$$

Падение напряжения в узле ВСД,  $j$ :

$$\begin{aligned} \dot{U}_{\text{СД},j}^{(y)} &= U_{j+2}^{(y)} - \Delta \dot{U}_{(j+2)\text{СД},j}^{(y)} = U_{j+2}^{(y)} - \Delta U_{(j+2)\text{СД},j}^{(y)} - j \delta U_{(j+2)\text{СД},j}^{(y)} = \\ &= U_{j+2}^{(y)} - \frac{P_{1j}^{(y)} \cdot r_j + Q_{1j}^{(y)} \cdot x_j}{U_{j+2}^{(y)}} - j \frac{P_{1j}^{(y)} \cdot x_j - Q_{1j}^{(y)} \cdot r_j}{U_{j+2}^{(y)}}. \end{aligned} \quad (3.29)$$

где  $\Delta \dot{U}_{(j+2)\text{СД},j}^{(y)}$  – падение напряжения в  $j$ -м радиальном токопроводе системы электроснабжения, кВ;

$\Delta U_{(j+2)\text{СД},j}^{(y)}$  – продольная составляющая падения напряжения в  $j$ -м радиальном токопроводе системы электроснабжения, кВ;

$\delta U_{(j+2)\text{СД},j}^{(y)}$  – поперечная составляющая падения напряжения в  $j$ -м радиальном токопроводе системы электроснабжения, кВ.

Модуль напряжения в узле ВСД,  $j$ :

$$U_{\text{СД},j}^{(y)} = \left| \dot{U}_{\text{СД},j}^{(y)} \right| = \sqrt{\left( U_{j+2}^{(y)} - \Delta U_{(j+2)\text{СД},j}^{(y)} \right)^2 + \left( \delta U_{(j+2)\text{СД},j}^{(y)} \right)^2}. \quad (3.30)$$

Точность расчета потокораспределений, потерь активной и реактивной мощности в элементах системы электроснабжения определяется выражениями [92]:

$$\left| U_1^{(y)} - U_1^{(y-1)} \right| < \zeta, \quad (3.31)$$

где  $\zeta$  –требуемая точность расчета.

$$\left| U_2^{(y)} - U_2^{(y-1)} \right| < \zeta, \quad (3.32)$$

$$\left| U_{j+2}^{(y)} - U_{j+2}^{(y-1)} \right| < \zeta, \quad (3.33)$$

$$\left| U_{сд,j}^{(y)} - U_{сд,j}^{(y-1)} \right| < \zeta. \quad (3.34)$$

Если условия (3.31-3.34) выполняются, тогда расчет заканчивается на итерации  $y$ , если не выполняются, то необходимо произвести следующую итерацию  $y + 1$  и при вычисленных значениях напряжений в узлах  $U_1^{(y)}$ ,  $U_2^{(y)}$ ,  $U_{j+2}^{(y)}$ ,  $U_{сд,j}^{(y)}$  рассчитать потокораспределения, потери активной и реактивной мощности в элементах системы электроснабжения. На основании полученных результатов итерации  $y + 1$  уточнить значения напряжений в узлах  $U_1^{(y+1)}$ ,  $U_2^{(y+1)}$ ,  $U_{j+2}^{(y+1)}$ ,  $U_{сд,j}^{(y+1)}$  и произвести проверку точности расчетов по (3.31-3.34).

Блок-схема алгоритма моделирования состояний системы электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами при изменении управляющих воздействий представлена на рисунке 3.4.

Алгоритм моделирования состояний системы электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами осуществляется следующими блоками [56, 101]:

- 1) терминатор: начало алгоритма;

- 2) ввод-вывод: ввод исходных данных (Приложение В);
- 3) процесс: задаются параметры заданного режима  $U_{GS}, U_{ВН.ном}, U_{НН.ном}, R, I_{*2,j}, m_j$ , где  $j = 1 \dots F$ ;
- 4) процесс: задается номер начальной итерации  $y$ ;
- 5) решение: при условии, если номер итерации  $j = 0$ , если «да», то выполняется блок 6, если «нет», то выполняется блок 7;
- 6) процесс: определяются начальные приближения напряжений в узлах системы электроснабжения по (3.8-3.10).
- 7) решение: расчет потокораспределений и потерь активной в СД по (3.5), методике, изложенной в главе 2 и (3.11-3.14), при заданных  $U_{СД,j}^{(y)}, j = 1 \dots F$ ;
- 8) решение: расчет потокораспределений, потерь активной и реактивной мощности в  $j$ -м радиальном токопроводе по (3.4), (3.15-3.16) и (3.3), при заданных  $U_{СД,j}^{(y)}, j = 1 \dots F$ ;
- 9) решение: расчет потокораспределений, потерь активной и реактивной мощности в  $i$ -м участке магистрального токопровода по (3.3) и (3.17-3.18), при заданных  $U_{j+2}^{(y)}, j = 1 \dots F$ ;
- 10) процесс: расчет потокораспределений, потерь активной и реактивной мощности в трансформаторе с РПН по (3.2) и (3.19-3.20), при заданном  $U_2^{(y)}$ ;
- 11) процесс: расчет потокораспределений, потерь активной и реактивной мощности в линии электропередач внешней энергосистемы по (3.3) и (3.21-3.22), при заданном  $U_1^{(y)}$ ;
- 12) процесс: переход к следующей итерации  $y + 1$ ;
- 13) процесс: определение падения напряжения в линии электропередач внешней энергосистемы по (3.23-3.24);
- 14) процесс: определение падения напряжения в трансформаторе с РПН по (3.25-3.26);
- 15) процесс: определение падения напряжения в  $i$ -м участке магистрального токопровода по (3.27-3.28);

16) процесс: определение падения напряжения в  $j$ -м радиальном токопроводе по (3.29-3.30);

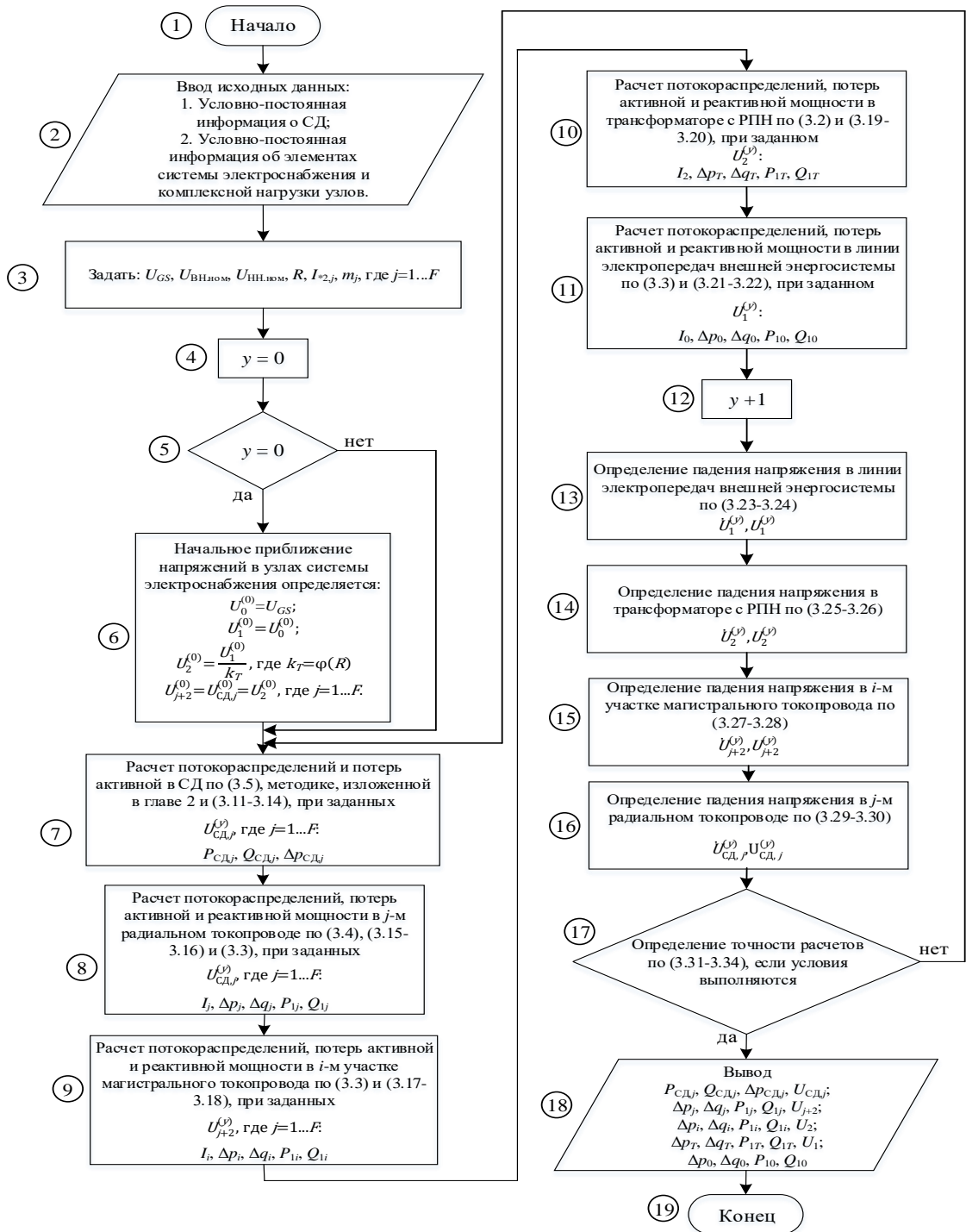


Рисунок 3.4 – Блок-схема алгоритма моделирования состояний системы электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами

17) решение: определение точности расчетов по (3.31-3.34), если условия выполняются, если «да», то выполняется блок 18, если «нет», то выполняется блок 7;

18) ввод-вывод: выход  $P_{сд,j}$ ,  $Q_{сд,j}$ ,  $\Delta p_{сд,j}$ ,  $U_{сд,j}$ ;  $\Delta p_j$ ,  $\Delta q_j$ ,  $P_{1j}$ ,  $Q_{1j}$ ,  $U_{j+2}$ ;  $\Delta p_i$ ,  $\Delta q_i$ ,  $P_{1i}$ ,  $Q_{1i}$ ,  $U_2$ ;  $\Delta p_T$ ,  $\Delta q_T$ ,  $P_{1T}$ ,  $Q_{1T}$ ,  $U_1$ ;  $\Delta p_0$ ,  $\Delta q_0$ ,  $P_{10}$ ,  $Q_{10}$ . Значения параметров режима выводятся из последней итерации, на которой закончился расчет.

19) терминатор: конец алгоритма.

### **Выводы по главе 3**

1. Приведена обобщенная структура и разработана расчётная схема системы электроснабжения, которая послужила основой для разработки математической модели системы электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами.

2. Особенностью разработанной математической модели обобщенной системы электроснабжения промышленного с активными элементами, является разбиение участков системы на элементы, каждый из которых имеет свои выходные и входные параметры, а также потери активной и реактивной мощностей.

3. С использованием методики расчета установившегося режима разомкнутой электрической сети по заданным значениям нагрузок и напряжению центра питания и разработанной расчётной схемы обобщенной системы электроснабжения промышленного разработан алгоритм моделирования состояний системы электроснабжения при изменении управляющих воздействий для решения задачи оценки уровня потерь активной мощности.

#### **4. РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ УРОВНЯ ПОТЕРЬ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ**

Уровень потерь активной мощности в системе электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами характеризует состояние, в котором находится система электроснабжения, с точки зрения эффективного использования электроэнергии в процессе функционирования предприятия. Оценка этого показателя позволяет определить в каком состоянии находится система электроснабжения в текущем режиме работы, и в каких состояниях она может находиться, при различных вариациях управляющих воздействий, для повышения энергетической эффективности её работы.

##### **4.1. Программа для оценки уровня потерь активной мощности в системе электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами**

Программа оценки уровня потерь активной мощности в элементах системы электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами в зависимости от изменения управляющих воздействий, а именно тока возбуждения групп ВСД  $I_2$ , и регулировочного положения отпайки РПН трансформатора  $R$  разработана с использованием математических зависимостей и в соответствии с алгоритмом, приведенных в главе 3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ представлено в приложении Е (№2022680603 от 03.11.2022) [82].

Программа позволяет моделировать заданный, по управляющим воздействиям, режим работы системы электроснабжения промышленного предприятия с определением множества параметров состояния системы электроснабжения для контроля алгоритма расчета, а также потери активной

мощности в элементах системы при использовании исходных данных, представленных в Приложении В;

Определение потерь активной мощности в элементах системы электроснабжения промышленного предприятия при заданных значениях  $I_{*2}$  и  $R$  осуществляется следующим образом:

1) «Ввод условно-постоянной информации об элементах системы электроснабжения», окно интерфейса программы представлено на рисунке 4.1. Ввод исходных данных может быть осуществлен непосредственно в окно интерфейса программы. Вводятся следующие значения параметров: для линии электропередач (длина  $l$ , активное сопротивление  $R_0$ , индуктивное сопротивление  $X_0$ , емкостная проводимость  $B_0$ ); для трансформатора с РПН (полная мощность трансформатора  $S_{T.ном}$ , номинальное напряжение высокой стороны трансформатора  $U_{ВН.ном}$ , номинальное напряжение низкой стороны трансформатора  $U_{НН.ном}$ , количество регулировочных положений РПН трансформатора относительно нулевого положения, напряжение короткого замыкания трансформатора  $U_{КЗ}$ , ток холостого хода трансформатора  $I_{ХХ}$ , потери активной мощности холостого хода трансформатора  $\Delta P_{ХХ}$ , потери активной мощности короткого замыкания трансформатора  $\Delta P_{КЗ}$ ); для участка токопровода (длина  $l$ , активное сопротивление  $R_0$ , индуктивное сопротивление  $X_0$ ); для узла нагрузки (момент нагрузки группы ВСД  $m$ , количество ВСД в группе  $n_{СД}$ , мощности комплексной нагрузки  $P_{кн}$  и  $Q_{кн}$ ); для центра питания (напряжение центра питания  $U_{GS}$ ); для сетей ВН и НН (напряжение сети ВН  $U_{ВН}$ , напряжение сети НН  $U_{НН}$ ); для ВСД.

2) «Управляющие воздействия», окно интерфейса программы представлено на рисунке 4.2. В данное окно вводятся значения управляющих воздействий, а именно регулировочное положение РПН трансформатора, от 1 до 19 положения, и токи возбуждения групп ВСД советующих узлов нагрузки. Расчёт параметров заданного режима осуществляется нажатием кнопки «Результат», после чего появляется окно интерфейса, представленное на рисунке 4.3.



Ввод условно-постоянной информации об элементах системы электроснабжения												
Линия электропередач			Трансформатор с РПН					Участок магистрального токопровода				
$l$	100	км	$S_{T_{ном}}$	40000	кВ·А				$W_i$			
$R_0$	0,198	Ом/км	$U_{вн.ном}$	115	кВ				$l, \text{ км}$	$R_0, \text{ Ом/км}$	$X_0, \text{ Ом/км}$	
$X_0$	0,42	Ом/км	$U_{нн.ном}$	6,3	кВ				1	0,1	0,129	0,071
$B_0$	0,0000027	См/км	РПН	9	± полож.	1,78	%		2	0,2	0,129	0,071
			$U_{кз}$	11	%				3	0,2	0,129	0,071
			$I_{хх}$	1	%				Напряжение центра питания			
			$\Delta P_{хх}$	36	кВт				$U_{сб}$	115	кВ	
			$\Delta P_{кз}$	172	кВт				Напряжения сетей ВН и НН			
Участок радиального токопровода $W_j$			Узел нагрузки $i$					$U_{нн}$	115	кВ		
	$l, \text{ км}$	$R_0, \text{ Ом/км}$	$X_0, \text{ Ом/км}$	Группа СД $i$		Комплексная нагрузка $i$		$U_{нн}$	6,3	кВ		
				$m, \text{ о.е.}$	$n_{сд}, \text{ шт.}$	$P_{нн}, \text{ кВт}$	$Q_{нн}, \text{ квар}$					
1	1	0,01	0,35	1	0,5	4	150	75				
2	1	0,01	0,35	2	0,7	2	50	25				
3	1	0,01	0,35	3	0,9	3	100	50				

Рисунок 4.1 – Окно ввода условно-постоянной информации об элементах системы электроснабжения

Управляющие воздействия		
Положение РПН	Ток возбуждения групп СД $i$	
9	1	0,8
От 1 до 19	2	0,8
	3	0,8

**Результат**

Рисунок 4.2 – Окно ввода управляющих воздействий

$I_2, \text{ о. е.}$	$R, \text{ отп}$	$U_2, \text{ кВ}$	$P_{2Г}, \text{ кВт}$	$Q_{2Г}, \text{ квар}$	$U_1, \text{ кВ}$	$P_{1Г}, \text{ кВт}$	$Q_{1Г}, \text{ квар}$	$P_{10}, \text{ кВт}$	$Q_{10}, \text{ квар}$	$\Sigma \Delta p_i + \Sigma \Delta p_j, \text{ кВт}$	$\Sigma \Delta p_{сд_j}, \text{ кВт}$	$\Delta p_{г}, \text{ кВт}$	$\Delta p_0, \text{ кВт}$	$\Sigma \Delta p, \text{ кВт}$
0,8	9	6,3	6484,9	766,8	114,1	6525,0	1279,8	6592,3	1422,5	31,0	428,6	40,1	67,3	566,9

Рисунок 4.3 – Окно результатов расчёта

В таблице рисунка 4.3 представлены следующие параметры режима: напряжение на стороне НН трансформатора с РПН  $U_2$ , активная мощность на стороне НН трансформатора с РПН  $P_{2T}$ , реактивная мощность на стороне НН трансформатора с РПН  $Q_{2T}$ , напряжение на стороне ВН трансформатора с РПН  $U_1$ , активная мощность на стороне ВН трансформатора с РПН  $P_{1T}$ , реактивная мощность на стороне ВН трансформатора с РПН  $Q_{1T}$ , активная мощность в центре питания  $P_{10}$ , реактивная мощность в центре питания  $Q_{10}$ , суммарные потери активной мощности в элементах системы внутреннего электроснабжения  $\Sigma\Delta p_i + \Sigma\Delta p_j$ , суммарные потери активной мощности в ВСД  $\Sigma\Delta p_{сдj}$ , потери активной мощности в трансформаторе с РПН  $\Delta p_T$ , потери активной мощности в элементах системы внешнего электроснабжения  $\Delta p_0$ , всего потерь активной мощности в системе электроснабжения промышленного предприятия  $\Sigma\Delta p$ .

## **4.2. Моделирование режимов работы системы электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами**

### **4.2.1. Режим компенсации реактивной мощности активных элементов**

Моделирование режима работы система электроснабжения промышленного предприятия произведем для случая, когда активные элементы работает в режиме компенсации реактивной мощности. Данный режим характеризуется тем, что потоки реактивной мощности направлены в сторону от активных элементов.

Исходные данные для моделирования представлены в Приложении В. Значения управляющих воздействий принимаем следующие:

- 1) ток возбуждения для всех групп ВСД  $I_{*2}$  равен 1 о.е., то есть соответствует номинальному току возбуждения;
- 2) 9 положение регулировочной отпайки РПН трансформатора  $R$ , которое соответствует номинальному напряжению высшей (115 кВ) и низшей (6,3 кВ) обмоток трансформатора.

Структура рассматриваемой системы электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами представлена на рисунке 4.4.

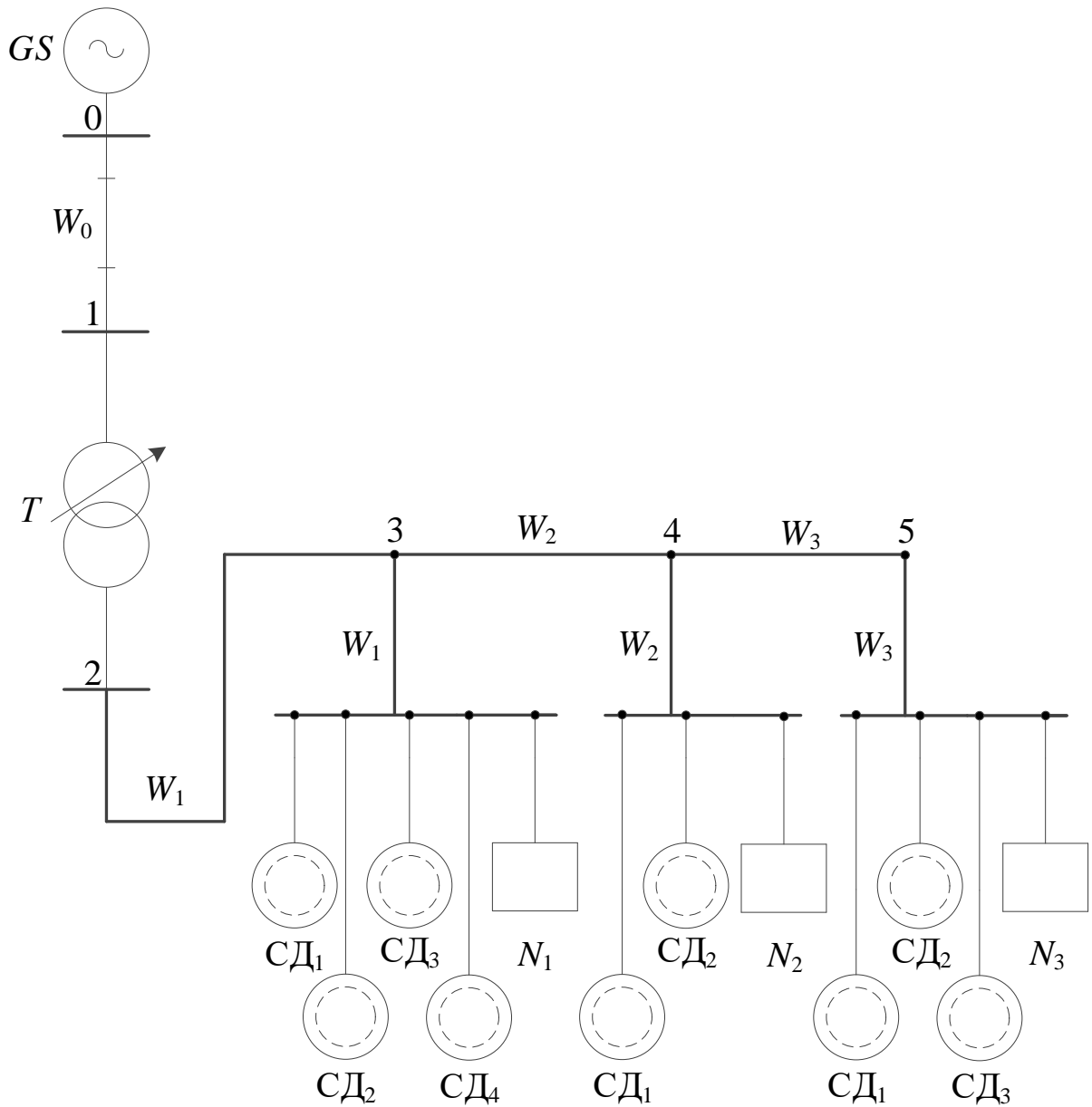


Рисунок 4.4 – Структура рассматриваемой системы электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами

В таблице 4.1 представлены параметры состояния системы электроснабжения, моделируемого режим работы.

Таблица 4.1 – Параметры состояния моделируемого режима работы

$U_2$ , кВ	$P_{2T}$ , кВт	$Q_{2T}$ , квар	$U_1$ , кВ	$P_{1T}$ , кВт	$Q_{1T}$ , квар	$P_{10}$ , кВт	$Q_{10}$ , квар	$\Sigma\Delta p_T + \Sigma\Delta p_J$ , кВт	$\Sigma\Delta p_{сдJ}$ , кВт	$\Delta p_T$ , кВт	$\Delta p_0$ , кВт	$\Sigma\Delta p$ , кВт
6,4	6548,8	-2634,7	114,8	6590,0	-2099,9	6661,9	-1947,3	34,9	576,4	41,2	71,9	724,3

Для оценки параметров состояния моделируемого режима работы на рисунке 4.5 представлена гистограмма потокораспределений из энергосистемы и потерь активной мощности в системе электроснабжения (режим компенсации реактивной мощности).

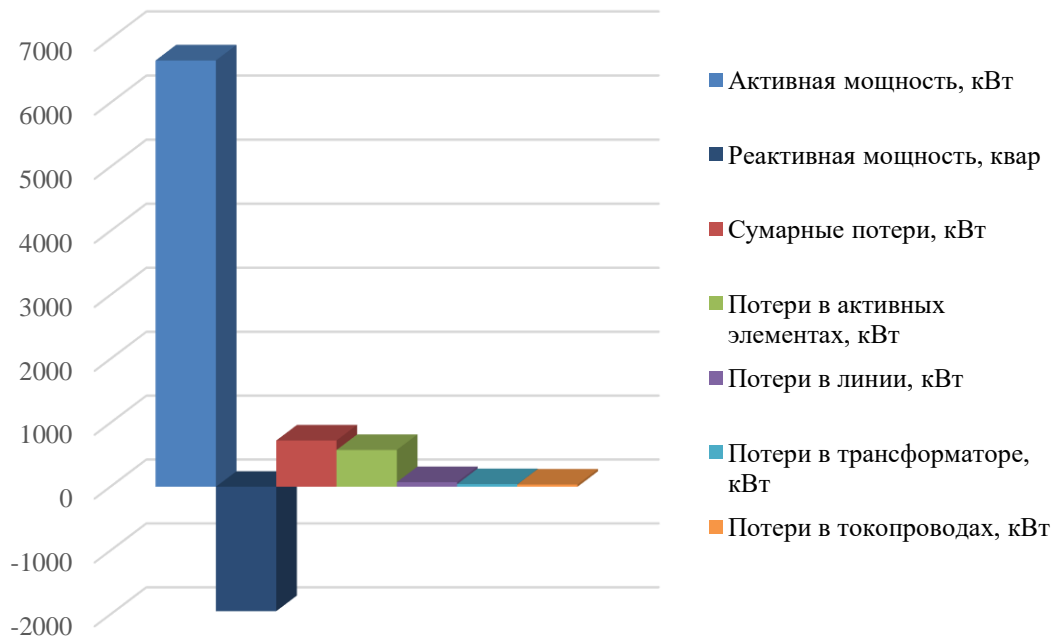


Рисунок 4.5 – Гистограмма потокораспределений из энергосистемы и потерь активной мощности в системе электроснабжения (режим компенсации реактивной мощности)

На основании данных, представленных в таблице 4.1 и рисунке 4.5, можно отметить следующее:

1) Величина потребляемой активной мощности из энергосистемы составляет 6661,9 кВт, а реактивной мощности -1947,3 квар, при условии что знак

минус характеризует направление потока реактивной мощности, а именно, её генерацию в энергосистему со стороны системы электроснабжения. В данном состоянии система электроснабжения промышленного предприятия является избыточно по реактивной мощности по отношению к энергосистеме.

2) Наблюдается увеличение напряжения в узле 2 распределительной сети системы электроснабжения выше номинального (для моделируемого режима работы номинальное напряжение в узле 2 составляет 6,3 кВ), величина которого составляет 6,4 кВ. Это объясняется тем, что за счет обратного потока реактивной мощности, под обратным понимается поток реактивной мощности из системы электроснабжения в сторону энергосистемы, снижается величина продольной и увеличивается величина поперечной составляющих падения напряжения элемента системы, согласно аналитическому выражению 3.23.

3) Напряжение в узле 1 незначительно отличается от номинального напряжения энергосистемы (для моделируемого режима работы номинальное напряжение в узле 1 составляет 115 кВ), величина которого составляет 114,8 кВ, и согласно обоснованию увеличения напряжения в распределительной сети системы электроснабжения в режиме обратного потока реактивной мощности, приведенного выше, напряжение узла энергосистемы увеличивается выше номинального. Это обстоятельство необходимо учитывать при анализе режимов работы энергосистем, так как системы электроснабжения промышленных предприятий в режиме генерации реактивной мощности могут оказывать существенное влияние на уровни напряжений в узлах энергосистемы за пределами своих границ балансовой принадлежности.

4) Суммарные потери активной мощности в системе электроснабжения промышленного предприятия составляют 724,3 кВт или 10,9 % от отпуска активной мощности из энергосистемы. Потери активной мощности в активных элементах составляют 576,4 кВт или 79,6 % от суммарных потерь активной мощности, что является существенной долей потерь активной мощности в системе электроснабжения.

#### 4.2.2. Режим потребления реактивной мощности из сети активных элементов

Моделирование режима работы система электроснабжения промышленного предприятия произведем для случая, когда активные элементы работают в режиме потребления реактивной мощности из сети. Данный режим характеризуется тем, что потоки реактивной мощности направлены в сторону активных элементов.

Исходные данные для моделирования представлены в Приложении В. Значения управляющих воздействий принимаем следующие:

- 1) ток возбуждения для всех групп ВСД  $I_{*2}$  равен 0,7 о.е., то есть соответствует режиму потребления реактивной мощности;
- 2) 9 положение регулировочной отпайки РПН трансформатора  $R$ , которое соответствует номинальному напряжению высшей (115 кВ) и низшей (6,3 кВ) обмоток трансформатора.

Структура рассматриваемой системы электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами представлена на рисунке 4.4.

В таблице 4.2 представлены параметры состояния системы электроснабжения, моделируемого режим работы.

Таблица 4.2 – Параметры состояния моделируемого режима работы

$U_2$ , кВ	$P_{2T}$ , кВт	$Q_{2T}$ , квар	$U_1$ , кВ	$P_{1T}$ , кВт	$Q_{1T}$ , квар	$P_{10}$ , кВт	$Q_{10}$ , квар	$\Sigma\Delta p_r + \Sigma\Delta p_j$ , кВт	$\Sigma\Delta p_{сд,j}$ , кВт	$\Delta p_T$ , кВт	$\Delta p_0$ , кВт	$\Sigma\Delta p$ , кВт
6,3	6507,4	4482,7	113,2	6549,3	5050,3	6654,9	5274,4	45,8	378,5	41,9	105,6	571,8

Для оценки параметров состояния моделируемого режима работы на рисунке 4.6 представлена гистограмма потокораспределений из энергосистемы и потерь активной мощности в системе электроснабжения (режим потребления реактивной мощности).

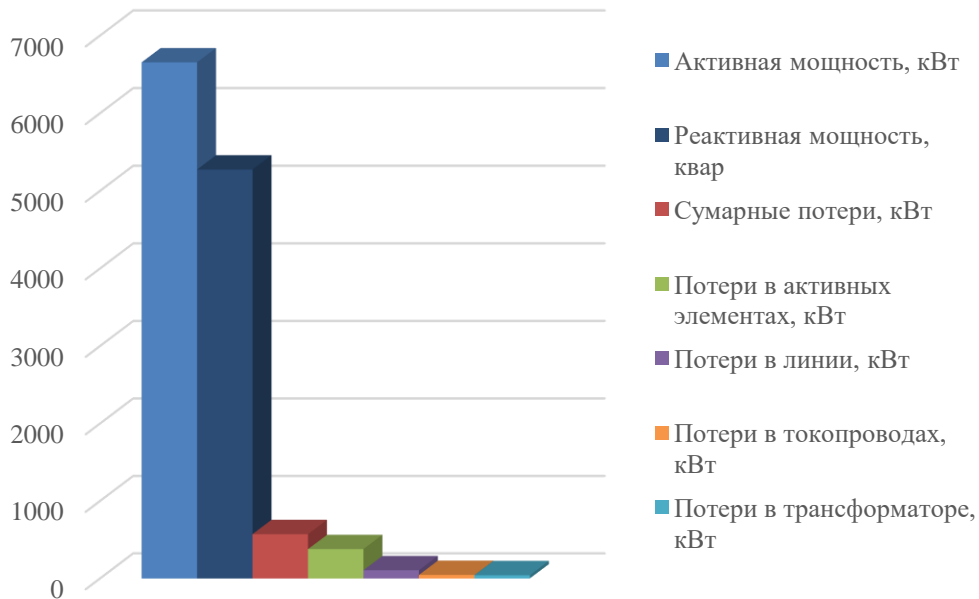


Рисунок 4.6 – Гистограмма потокораспределений из энергосистемы и потерь активной мощности в системе электроснабжения (режим потребления реактивной мощности)

На основании данных, представленных в таблице 4.2 и рисунке 4.6, можно отметить следующее:

1) Величина потребляемой активной мощности из энергосистемы составляет 6654,9 кВт, а реактивной мощности 5274,4 квар. В данном состоянии система электроснабжения промышленного предприятия является дефицитной по реактивной мощности по отношению к энергосистеме.

2) Напряжение в узле 2 распределительной сети системы электроснабжения соответствует номинальному напряжению. Это объясняется тем, что порядковый номер положения регулировочной ступени РПН трансформатора, который соответствует 9 положению, выбран так, чтобы напряжение в узле 2 поддерживалось на уровне номинального.

3) Напряжение в узле 1 снижается по отношению к номинальному напряжению энергосистемы, величина которого составляет 113,2 кВ. Это объясняется тем, что в режиме потребления реактивной мощности из

энергосистемы на участке питающей линии происходит естественное падение напряжения.

4) Суммарные потери активной мощности в системе электроснабжения промышленного предприятия составляют 571,8 кВт или 8,6 % от отпуска активной мощности из энергосистемы. Потери активной мощности в активных элементах составляют 378,5 кВт или 66,2 % от суммарных потерь активной мощности, а разница между рассматриваемыми режимами компенсации и потребления реактивной мощности составляет около 200 кВт. Это обстоятельство характеризует то, что с точки зрения энергетической эффективности режим компенсации реактивной мощности активных элементов существенно отличается от режима потребления по потерям активной мощности, а именно режим компенсации за счет изменения тока возбуждения, и является не эффективным.

### **4.3. Анализ уровня потерь активной мощности в системе электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами**

Для анализа уровня потерь активной мощности в системе электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами воспользуемся разработанной в этой главе программой оценки уровня потерь активной мощности в системе электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами и проведем вычислительный эксперимент с использованием теории полного факторного эксперимента [5, 59].

План полного факторного эксперимента [5, 59], на основании которого осуществлены эксперименты, включает в себя:

- 1) количество факторов  $K = 2$ , к ним относятся токи возбуждения групп ВСД  $I_{*2}$  и регулировочное положение отпайки РПН трансформатора  $R$ ;
- 2) количество откликов  $G = 13$ , данные параметры представлены в Подпункте 2 Главы 4;



3) количество уровней факторов  $M = 5$ , при этом количество проводимых опытов будет составлять по (2.29)  $N = 25$ ;

4) границы изменения факторов: токи возбуждения групп ВСД  $I_{*2}$ , от 0,6 до 1,0; положения регулировочной ступени РПН трансформатора  $R$  (кВ): 6 (6,6), 9 (6,3), 12 (6,0), 15 (5,7) и 18 (5,4).

План полного факторного эксперимента и результаты вычислительного эксперимента представлены в Приложении Г. Графические зависимости, полученные в результате вычислительного эксперимента представлены на рисунках 4.7-4.10. На рисунках 4.8 и 4.10 положительные значения реактивной мощности  $Q$  соответствуют режиму потребления из центра питания, а отрицательные значения соответствуют режиму генерации.

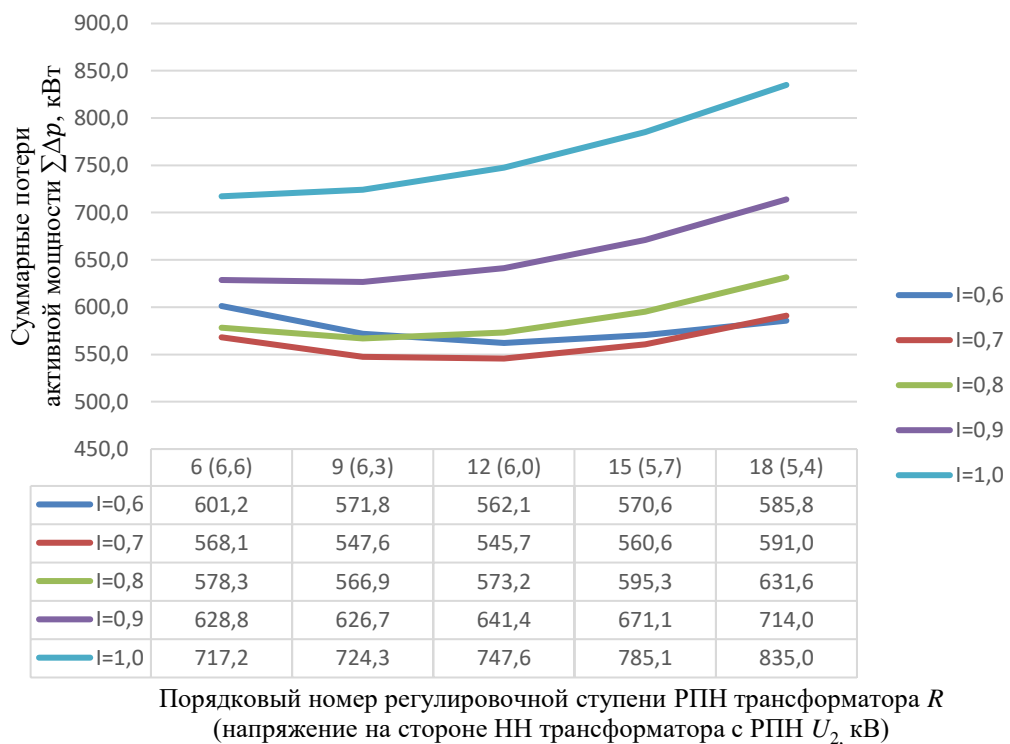


Рисунок 4.7 – Графические зависимости суммарных потерь активной мощности  $\sum \Delta p$  от порядкового номера регулировочной ступени РПН трансформатора  $R$  (напряжения на стороне НН трансформатора с РПН  $U_2$ ) при фиксированных значениях токов возбуждений  $I_{*2}$  групп одноступенчатых ВСД

Как видно из рисунка 4.7, при токах возбуждения, находящихся в диапазоне от 0,6 до 0,8 о.е., суммарные потери активной мощности слабо зависят от порядкового номера регулировочной ступени РПН трансформатора, то есть от изменения напряжения в узлах системы электроснабжения промышленного предприятия. Однако при наименьшем токе возбуждения, а именно 0,6 о.е., потери мощности находятся в обратной зависимости от порядкового номера регулировочной ступени РПН трансформатора, чем выше порядковый номер РПН ( $U_2$  изменяется от 6,6 кВ до 5,4 кВ), тем меньше потери мощности. Это объясняется тем, что снижение потерь активной мощности в элементах системы электроснабжения за счет уменьшения величины потребляемой реактивной мощности из энергосистемы значительно превышает изменение потерь в ВСД из-за снижения потребления реактивной мощности, вызванного снижением напряжения в узлах.

При токах возбуждения, больших, чем 0,7 о.е., такая зависимость практически не замечается. В области наибольших токов, например 0,9 и 1,0 о.е., данная зависимость становится резко возрастающей, чем выше порядковый номер регулировочной ступени РПН трансформатора ( $U_2$  изменяется от 6,6 кВ до 5,4 кВ), тем больше суммарные потери активной мощности в системе электроснабжения.

Из рисунка 4.8 следует, что при любых значениях тока возбуждения групп однотипных ВСД зависимость реактивной мощности от порядкового номера регулировочной ступени РПН трансформатора имеет резко изменяющийся характер, чем выше порядковый номер РПН ( $U_2$  изменяется от 6,6 кВ до 5,4 кВ), тем больше снижается потребление реактивной мощности из центра питания, то есть при снижении напряжения в узлах системы электроснабжения промышленного предприятия увеличивается генерация реактивной мощности. При токах возбуждения 0,8 о.е. и выше имеется возможность, при соответствующих регулировочных ступенях РПН трансформатора, исключить потребление реактивной мощности из центра питания, а также обеспечить ее

генерацию. Используя изменение порядкового номера регулировочной ступени РПН трансформатора, обеспечивается возможность перевода ВСД как в режим потребления реактивной мощности (положительное значение  $Q$ ), так и в режим её генерации (отрицательное значение  $Q$ ).

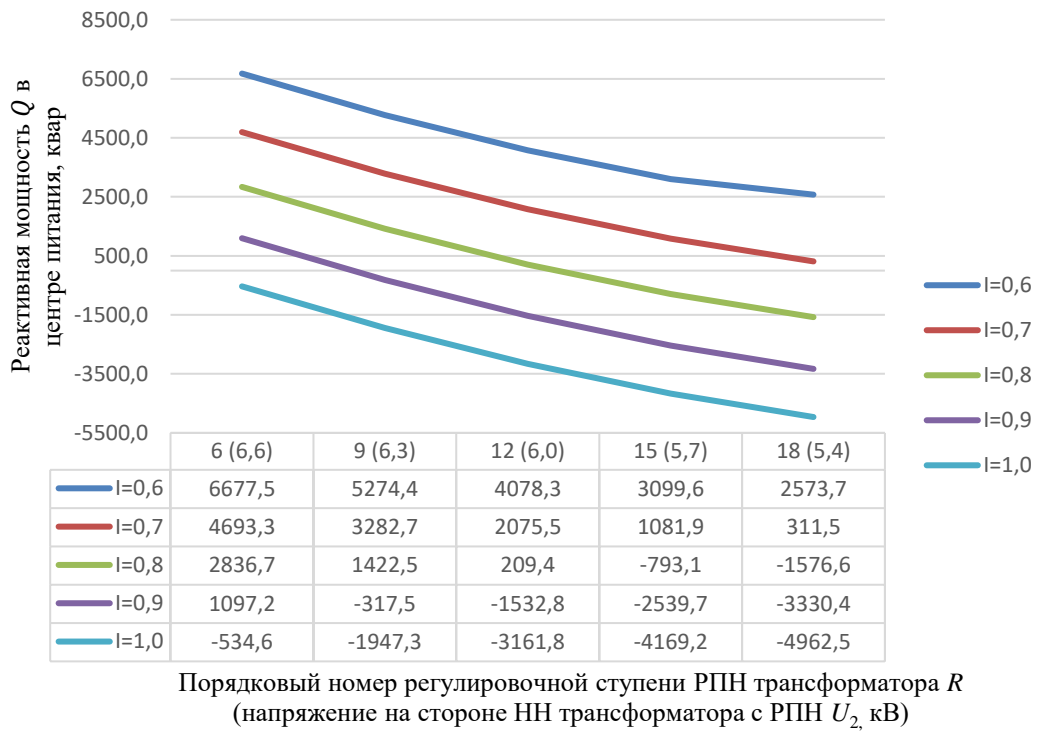


Рисунок 4.8 – Графические зависимости реактивной мощности  $Q$  в центре питания от порядкового номера регулировочной ступени РПН трансформатора  $R$  (напряжения на стороне НН трансформатора с РПН  $U_2$ ) при фиксированных значениях токов возбуждения  $I_{*2}$  групп однотипных ВСД

Зависимости на рисунке 4.9 показывают, что суммарные потери активной мощности значительно возрастают, начиная с тока возбуждения 0,8 о.е. Некоторое падение потерь активной мощности на графиках видно лишь при номерах регулировочной ступени 6 (6,6 кВ), 9 (6,3) и 12 (6,0 кВ), однако такое падение заметно лишь в диапазоне токов возбуждения от 0,6 до 0,7 о.е., к тому же оно совсем незначительное. Это объясняется тем, что при увеличении тока

возбуждения от 0,6 о.е., ВСД находятся в режиме потребления реактивной мощности из сети, потери в элементах системы электроснабжения снижаются быстрее по сравнению с возрастающими потерями в ВСД, за счет снижения потребления реактивной мощности, далее потери снижаются до минимальных значений, и обратный процесс, потери в элементах системы электроснабжения и ВСД возрастают, за счет генерации реактивной мощности.

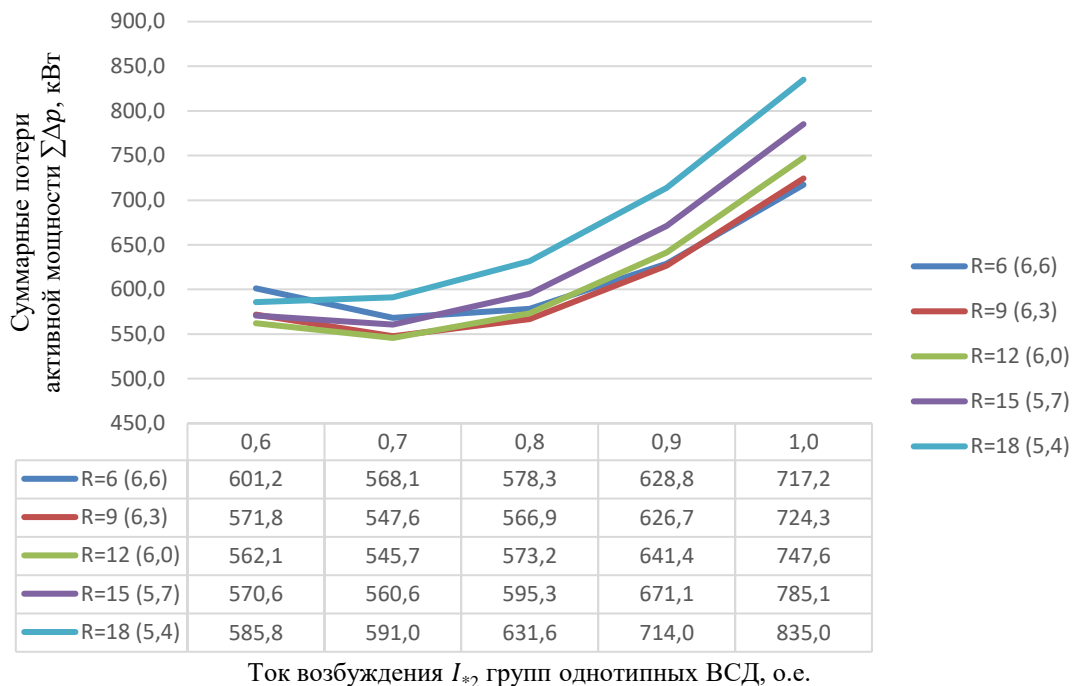


Рисунок 4.9 – Графические зависимости суммарных потерь активной мощности  $\sum \Delta p$  от тока возбуждения  $I_{*2}$  групп однотипных ВСД при фиксированных порядковых номерах регулировочных ступеней РПН трансформатора  $R$  (напряжениях на стороне НН трансформатора с РПН  $U_2$ )

Представленные зависимости на рисунке 4.10 показывают, что с ростом тока возбуждения групп однотипных ВСД потребляемая реактивная мощность из центра питания  $Q$  снижается, причём зависимость практически линейна. При порядковом номере 6 (6,6 кВ) ступени РПН трансформатора ВСД находятся в режиме потребления реактивной мощности (положительное значение  $Q$ ), при

порядковых номерах 9 (6,3 кВ), 12 (6,0 кВ), 15 (5,7 кВ) и 18 (5,4 кВ) в режиме генерации реактивной мощности (отрицательное значение  $Q$ ). Как видно из рисунка 4.10, увеличение порядкового номера регулировочной ступени РПН трансформатора и тока возбуждения групп однотипных ВСД в 1 очередь снижают потребление промышленным предприятием реактивной мощности из центра питания, и во вторую очередь позволяют генерировать реактивную мощность существенных объемов в энергосистему. Это объясняется тем, что режим работы групп однотипных ВСД, сначала характеризуется снижением потребления реактивной мощности из сети до нуля, а затем её генерацией.

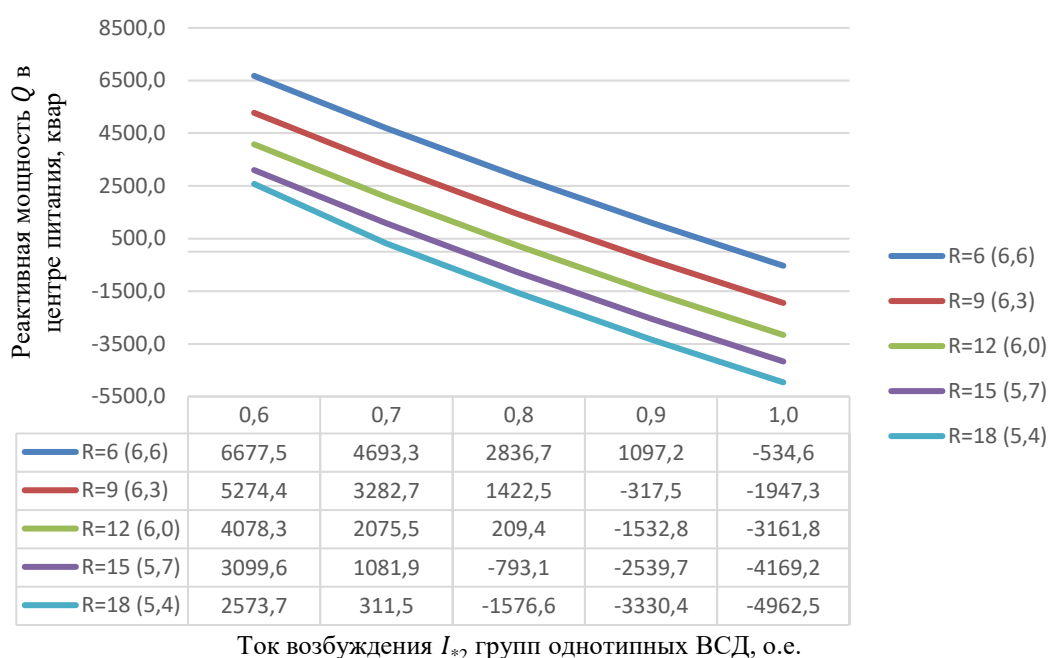


Рисунок 4.10 – Графические зависимости реактивной мощности  $Q$  в центре питания от тока возбуждения  $I_{*2}$  групп однотипных СД при фиксированных порядковых номерах регулировочных ступеней РПН трансформатора  $R$  (напряжениях на стороне НН трансформатора  $U_2$ )

На основании результатов экспериментов, в результате которых были определены потери активной мощности в системе электроснабжения

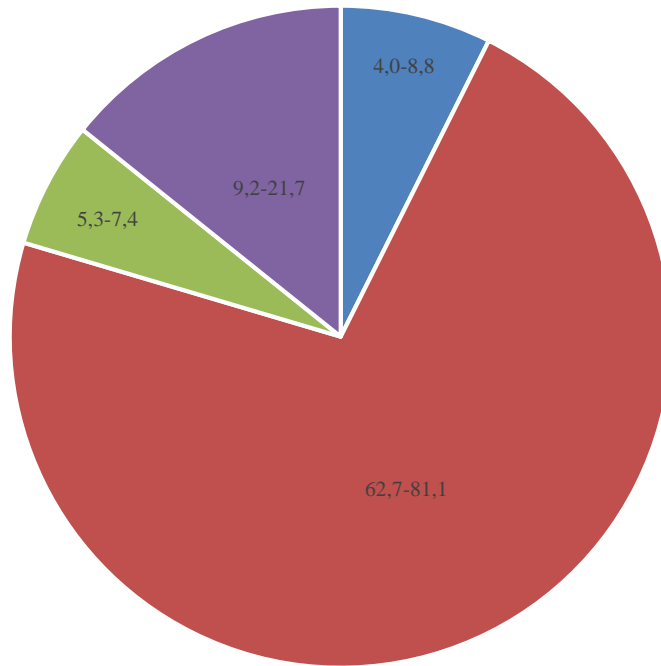
промышленного предприятия с активными элементами при изменении управляющих воздействий, представленных в приложении Г, был произведен анализ структуры потерь активной мощности во всех активных элементах и элементах системы электроснабжения.

Результаты анализа показали, что:

1. Изменения управляющих воздействий, а именно, токов возбуждения групп однотипных ВСД и регулировочной ступени РПН трансформатора в заданных диапазонах, позволяют изменять суммарные потери активной мощности в системе электроснабжения промышленного предприятия от 545,7 кВт до 835 кВт или по отношению к потребляемой активной мощности из энергосистемы от 8,3 % до 12,3 %. Это обстоятельство характеризуется тем, что существуют возможности снижения потерь активной мощности в системе электроснабжения с активными элементами.

2. Представленная на рисунке 4.11 структура потерь активной мощности в системе электроснабжения промышленных предприятий с активными элементами показывает, что при изменении управляющих воздействий в заданных диапазонах, согласно плану эксперимента по отношению к суммарным потерям в системе электроснабжения, потери активной мощности в элементах распределительной сети изменяются в пределах от 4,0 до 8,8 %; суммарные потери активной мощности в ВСД от 62,7 до 81,1 %; потери активной мощности в трансформаторе с РПН от 5,3 до 7,4 %; а потери активной мощности в элементах системы внешнего электроснабжения от 9,2 до 21,7 %.

3. Существенную долю в структуре потерь активной мощности в системе электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами занимают потери в ВСД (более 60 %). Оставшаяся часть потерь активной мощности приходится на элементы распределительной сети и внешнего электроснабжения, и в зависимости от вариаций управляющих воздействий, эти потери могут изменяться более чем в 2 раза, притом, что потери в трансформаторе с РПН изменяются несущественно.



- Суммарные потери активной мощности в элементах распределительной сети, %
- Суммарные потери активной мощности в ВСД, %
- Потери активной мощности в трансформаторе с РПН, %
- Потери активной мощности в элементах системы внешнего электроснабжения, %

Рисунок 4.11 – Структура потерь активной мощности в системе электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами

## Выводы по главе 4

1. Разработана и реализована программа для ЭВМ (№2022680603 от 03.11.2022), которая позволяет моделировать параметры установившегося режима работы системы электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами, при изменении управляющих воздействий. Это позволило произвести количественную оценку уровня потерь активной мощности в активных элементах и элементах системы электроснабжения в режимах потребления из энергосистемы и генерации в энергосистему реактивной мощности. Разработанное программное обеспечение может быть использовано для решения широкого круга задач электроснабжения, в частности, классификации [95] и оптимизации режимов работы по различным критериям [100].

2. Моделирование режимов работы системы электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами показало, что существуют возможности повышения энергетической эффективности за счет снижения потерь активной мощности в системе электроснабжения, посредством изменения тока возбуждения ВСД и уровня напряжения в узлах системы электроснабжения, используя РПН трансформатора на ГПП.

3. Анализ структуры потерь активной мощности в системе электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами показал, что существенной долей являются потери активной мощности в ВСД (более 60%). Однако, при проектировании и эксплуатации систем электроснабжения, даже при решении задач компенсации реактивной мощности, ВСД часто рассматриваются как электроприёмники [35, 40, 60, 73, 75, 80, 84, 88], в которых не учитываются потери активной мощности, что существенно искажает их реальную эффективность использования для снижения потерь активной мощности в системах электроснабжения промышленных предприятий.



## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Основные результаты работы заключаются в разработке математического, методического и программного обеспечения, позволяющего обосновать эффективность использования высоковольтных синхронных двигателей для снижения потерь активной мощности в системах электроснабжения промышленных предприятий.

В работе решены следующие задачи:

1. Впервые разработана методика оценки состояния ВСД, которая позволила создать основу для рассмотрения двигателя в качестве активного элемента в составе системы электроснабжения промышленного предприятия. Данная методика может применяться к различным типам ВСД, за счет учета множества факторов.

2. Разработана программа «Оценка состояния синхронного двигателя» (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021680084 от 07.12.2021), которая позволяет производить оценку параметров состояния заданного режима ВСД, а также моделировать множество режимов для исследования регулирующих эффектов по управляющим воздействиям.

3. Разработана математическая модель обобщенной системы электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами, которая ориентирована на адекватную оценку уровня потерь активной мощности при различных управляющих воздействиях. Особенность математической модели заключается в том, что она позволяет учитывать потери активной мощности во всех элементах системы электроснабжения;

4. Разработана программа «Программа оценки уровня потерь активной мощности в системе электроснабжения промышленного предприятия с синхронными двигателями» (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ (№2022680603 от 03.11.2022), позволяющая моделировать режимы работы обобщенной системы электроснабжения промышленного

предприятия, с заданным количеством активных элементов, что дает возможность анализировать влияние управляющих воздействий на потери активной мощности во всех элементах системы электроснабжения для повышения энергетической эффективности функционирования промышленного предприятия.

Направлением развития полученных решений является разработка алгоритмов управления процессами электроснабжения на основе методов оптимизации по критерию минимума потерь активной мощности в системе электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Абрамович, Б.Н. Электропривод и электроснабжение горных предприятий: Учебное пособие / Б.Н. Абрамович, Д.А. Устинов. СПб: Санкт-Петербургский государственный горный институт, 2004. – 84 с.
2. Абрамович, Б.Н. Возбуждение, регулирование и устойчивость синхронных двигателей / Б.Н. Абрамович, А.А. Круглый. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1983. – 128 с.
3. Автоматизированная система учёта электрической энергии и управления режимами активной и реактивной мощности (Книга 1): отчет о НИР / Архипенко В.В. – Красноярск: Производственное объединение «Сибэнергоцветмет», 1985. – 141 с.
4. Автоматизированная система учёта электрической энергии и управления режимами активной и реактивной мощности (Книга 2): отчет о НИР / Архипенко В.В. – Красноярск: Производственное объединение «Сибэнергоцветмет», 1985. – 152 с.
5. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 279 с.
6. Акимова, Н.А. Монтаж, техническая эксплуатация и ремонт электрического и электромеханического оборудования: Учебник / Н.А. Акимова. - М.: Academia, 2018. - 204 с
7. Алексеев, Е.Р. Программирование на FreePascal Lazarus/ Е.Р. Алексеев, О.В. Чеснокова, Т.В. Кучер – М.: Национальный Открытый Университет «ИНТУИТ», 2016. – 552 с.
8. Алимходжаев К.Т., Пардабоев А.Д. Целесообразность использования синхронного двигателя в качестве компенсатора реактивной мощности // Современные научные исследования и инновации. 2017. № 12.

9. Ананичева, С.С. Схемы замещения и установившиеся режимы электрических сетей: Учебное пособие. – 4-е изд. испр. и доп. / С.С. Ананичева, А.Л. Мызин. Екатеринбург: УГТУ, 2001. – 78 с.

10. Арушанян, И.О. Численные алгоритмы решения нелинейных уравнений: учебное пособие / И.О. Арушанян. –М.: Московский гос. ун-т, 2018. – 39 с.

11. Архипенко, В.В. Метод определения потерь активной мощности в синхронном двигателе / В.В. Архипенко // Электричество. – 1973. - №2. – С. 12-14.

12. Ахлюстин, В. К. Электрификация обогатительных фабрик / В. К. Ахлюстин. М.: Недра, 1973. – 424 с.

13. Багдасарян, М. К. К улучшению режимов электропотребления в производстве измельчения минерального сырья / М.К. Багдасарян, Д.К. Аракелян // Национальная ассоциация ученых. – 2015. - № 4-2 (9). – С. 61-64.

14. Белобородова, Н.А. Практикум по программированию на языке высокого уровня / Н.А. Белобородова. – Ухта: УГТУ, 2004. – 128 с.

15. Беляевский, Р.В. Вопросы компенсации реактивной мощности: учеб. пособие / Р.В. Беляевский. Кемерово: КузГТУ, 2011. – 132 с.

16. Вайнштейн, Р.А. Математические модели элементов электроэнергетических систем в расчетах установившихся режимов и переходных процессов: учебное пособие / Р.А. Вайнштейн, Н.В. Коломиец, В.В. Шестакова. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 115 с.

17. Васюра, Ю.Ф. Математические методы расчета установившихся режимов работы электроэнергетических систем с примерами и иллюстрациями: Учебное пособие / Ю.Ф. Васюра, А.В. Вильнер. Киров: Изд-во Кировский облкомстат, 2009. – 146 с.

18. Вершинин, П.П. Повышение эффективности режимов передачи и потребления электроэнергии в отраслях тяжелой промышленности на базе комплексного использования синхронных двигателей / П.П. Вершинин: дис. ... д-р техн. наук: 05.09.03. – Днепропетровск, 1984. – 467 с.

19. Вершинин, П.П. Применение синхронных электроприводов в металлургии / П.П. Вершинин, Л.Я. Хашпер. – М: Металлургия, 1974. – 272 с.
20. Волкова, И.О. Активный потребитель: задача оптимизации потребления электроэнергии и собственной генерации / И.О. Волкова, М.В. Губко, Е.А. Сальников // Проблемы управления. – 2013. - №6. – С. 53-61.
21. Вольдек, А.И. Электрические машины. Учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений. – 3-е изд., перераб. / А.И. Вольдек. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.
22. Воротницкий, В.Э. Энергетическая эффективность и компенсация реактивной мощности в электрических сетях. Проблемы и пути решения / В.Э. Воротницкий // Энергосовет. – 2017. - №47. – С. 44-53.
23. Герасименко, А.А. Передача и распределение электрической энергии / А.А. Герасименко, В.Т. Федин. – 2 изд. – Ростов н/Д: Феникс, 2008. – 715 с.
24. Герасимов, С.Е. Регулирование напряжения в распределительных сетях / С.Е. Герасимов, А.Г. Меркурьев. С-Пб.: Центр подготовки кадров СЗФ АО «ГВЦ Энергетики», 1998. – 84 с.
25. Глебова М. Л. Синхронные машины. Машины постоянного тока: конспект лекций по дисциплине «Электрические машины» (для студентов 3-4 курсов обучающихся по направлению 6.050701 «Электротехника и электротехнологии», 6.050702 «Электромеханика») / М. Л. Глебова, А. И. Кузнецов, И. Т. Кармалюк, М. В. Чернявская; Харьк. нац. акад. город. хоз-ва. – Х.: ХНАГХ, 2009. – 236 с.
26. Горожанкин, П.А. Управление напряжением и реактивной мощностью в электроэнергетических системах. Европейский опыт/ П.А. Горожанкин, А.В. Майоров, С.Н. Макаровский, А.А. Рубцов // Электрические станции. – 2008. - №6. – С. 40-47.
27. Грейсух, М.В. Упрощенный метод опрвления активных потерь в синхронном двигателе на генерирование реактивной мощности / М.В. Грейсух // Промышленная энергетика. – 1974. - №5. – С. 16-17.

28. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014. 20 с.

29. Гужов, Н.П. Системы электроснабжения: учебник / Н.П. Гужов, В.Я. Ольховский, Д.А. Павлюченко. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. – 258 с.

30. Гуревич, Е.Я. Синхронные компенсаторы / Е.Я. Гуревич. – М: Госэнергоиздат, 1958. – 368 с.

31. Гурьев, Е.К. Итерационные методы решения нелинейных уравнений: учебное пособие / Е.К. Гурьев, А.М. Никулин. –М.: МАТИ, 2005. – 176 с.

32. Давыдов, А.Н. Линейное программирование: графический и аналитический методы: учебное пособие / А.Н. Давыдов. – Самара: СГАСУ, 2014. – 106 с.

33. Давыдова, Н.А. Численные методы решения задач: учебно-методическое пособие для бакалавров информационных профилей педагогических вузов / Н.А. Давыдова. – Челябинск: Изд-во Южно-Урал. гос. гуман.-пед. ун-та, 2019. – 58 с.

34. Дорофеев В.В., Макаров А.А. Активно-адаптивная сеть – новое качество ЭЭС/ В.В. Дорофеев, А.А. Макаров // Энергоэксперт. – 2009, - № 4 (15). – С.34.

35. Ермилов, А.А. Основы электроснабжения промышленных предприятий / А.А. Ермилов. – 4 изд., перераб. и доп. – М: Энергоатомиздат, 1983. – 208 с.

36. Ефременко, В.М. О совершенствовании механизмов взаимоотношений энергоснабжающих организаций и потребителей в области компенсации реактивной мощности / В.М. Ефременко, Р.В. Беляевский // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2012. - №2 (90). – С. 59-62.

37. Зубов, А. Программирование на Delphi. Трюки и эффекты. – СПб.: Питер, 2005. – 396 с.

38. Кабышев, А.В. Компенсация реактивной мощности в электроустановках промышленных предприятий: учебное пособие / А.В. Кабышев. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 234 с.

39. Кимбарг, Э. Синхронные машины и устойчивость электрических систем / Э. Кимбарг. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 392 с.

40. Князевский, Б.А. Электроснабжение промышленных предприятий: Учеб. для студ. Вызов по спец. «Электропривод и автоматизация промышленных установок». – 3-е изд., перераб. и доп. / Б.А. Князевский, Б.Ю. Липкин. М.: Высш. шк., 1986. – 400 с.

41. Кокин С.Е., Дмитриев С.А. Хальясмаа И.И. Схемы электрических соединений подстанций. Издание УрФУ им. Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, 2015, 100 с.

42. Коновалов, Ю.В. Расчет параметров установившегося режима работы синхронного двигателя при использовании его компенсирующих способностей / Ю.В. Коновалов // Вестник Ангарской государственной технической академии Том 3. – 2009. - №1.– С. 82-85.

43. Коновалов, Ю.В. Оптимизация режимов работы электротехнических комплексов с синхронными двигателями в современных условиях ценообразования / Ю.В. Коновалов // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2017. - №12. – С. 149-163.

44. Константинов, Б.А. Компенсация реактивных нагрузок в электрических сетях предприятий / Б.А. Константинов, Ю.Ф. Лыков. – М: МДНТП, 1972.

45. Конюхова, Е.А. Определение потерь мощности по потерям напряжения в электрических сетях промпредприятий / Е.А. Конюхова. М.: НТФ «Энергопрогресс», 2003. – 72 с.

46. Костин, В.Н. Передача и распределение электроэнергии: учебное пособие / В.Н. Костин, Е.В. Распопов, Е.А. Родченко. –СПб.: СЗТУ, 2003. – 147 с.

47. Кубарьков, Ю.П. Внедрение активно-адаптивных элементов в электрические сети / Ю.П. Кубарьков, К.А. Голубева // Материалы VII Международной молодёжной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи - 2016». – Казань: КГЭУ, 2016. – С. 272-275.

48. Кубарьков, Ю.П. Оптимизация уровней напряжения в активно-адаптивных сетях с распределенной генерацией / Ю.П. Кубарьков, И.С. Кулаев, Р.А. Алехин // Вестник СамГТУ. Серия «Технические науки». – 2018. - №3 (59). – С. 154-164.

49. Кудрин, Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий: Учебник для студентов высших учебных заведений / Б.И. Кудрин. М.: Интермет Инжиниринг, 2005. – 672 с.

50. Кузьмин, В.В. Анализ средств компенсации реактивной мощности в электрических сетях Украины / В.В. Кузьмин, И.Г. Кирисов, С.В. Малинин // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2012. - №5 (99). – С. 45-50.

51. Куренный, Э.Г. Компенсация реактивных нагрузок и снижение потерь электрической энергии в сетях промышленных предприятий / Э.Г. Куренный, Ю.Г. Глухов, Е.Н. Дмитриева. – М: Знание, 1977.

52. Лейтес, Л.В. Схемы замещения многообмоточных трансформаторов / Л.В. Лейтес, А.М. Пинцов. – М.: Энергия, 1974.

53. Литвак, Л.В. Рациональная компенсация реактивных нагрузок на промышленных предприятиях / Л.В. Литвак; 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 256 с.

54. Лищенко, А.И. Синхронные двигатели с автоматическим регулированием возбуждения / А.И. Лищенко. Киев: Техніка, 1969. – 192 с.

55. Лихачев, В.Л. Справочник обмотчика асинхронных электродвигателей [Электронный ресурс]: учеб. пособие / В.Л. Лихачев – М.: Солон-Р, 2014. – 238 с. – 1000 экз. – ISBN978-5-98003-120-6.

56. Логинов, В.И. Основы алгоритмизации: учеб.-метод. пособие для студ. оч. и заоч. обуч. технич. специальностей / В.И. Логинов, Л.Н. Шемагина, – Н. Новгород.: Изд-во ФГОУ ВПО «ВГАВТ», 2010. – 81 с.

57. Лыкин, А.В. Электрические системы и сети: Учебное пособие / А.В. Лыкин. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 248 с.



58. Макаричев, Ю.А. Синхронные машины: учеб. пособ. / Ю.А. Макаричев, В.Н. Овсянников. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. – 156 с.

59. Макаричев, Ю.А. Методы планирование эксперимента и обработки данных: учеб. пособие / Ю.А. Макаричев, Ю.Н. Иванников. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2016. – 131 с.

60. Маньков, Д.Д. Основы проектирования системы электроснабжения: справочное пособие / Д.Д. Маньков. СПб: НОУ ДПО «УМИТЦ «Электро Сервис», 2010. – 664 с.

61. Мелихова, Е.В. Прикладная математика: численные методы решения алгебраических и дифференциальных уравнений: учебное пособие / Е.В. Мелихова. – Волгоград: ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ, 2016. – 88 с.

62. Муратов Г.Г., Шойимов Й.Ю., Махамаджанов Р.К., Ганиев С.Т. Исследование автоматизированной защиты конденсаторных установок. Ташкентский ГТУ им. Ислама Каримова, Алмалыкский филиал, г. Алмалык, Республика Узбекистан.

63. Никольский, Б.В. Эксплуатация и ремонт электрических машин на металлургических заводах / Б.В. Никольский, Д.Б. Милявский. – 2 изд., исп. и доп. – М: Металлургия, 1973. – 160 с.

64. Никулин, И.А. Расчет режима возбуждения синхронных двигателей, обеспечивающего минимум потерь электроэнергии / И.А. Никулин, В.А. Трошин, Ю.М. Тюханов // Электричество. – 1965. - №4. – С. 8-13.

65. Новиков, Н.Н. Синхронные двигатели: справочник для студентов электротехнических и электроэнергетических специальностей / Н.Н. Новиков, И.Е. Родионов, В.Ф. Шутько. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2005. – 36 с.

66. Осинская, И.В. Численные методы решения алгебраических уравнений и их систем: электрон. учеб. пособие / И.В. Осинская, А.Г. Шляпугин, Я.А. Ерисов. Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С.П. Королева, 2012. – 69 с.

67. Основные положения концепции интеллектуальной энергосистемы с активно-адаптивной сетью. Разработано по заказу ОАО «ФСК ЕЭС» и ОАО «НТЦ Электроэнергетики». 2012, 51 с.

68. Пилюгин, Г.А. Методика оценки состояния синхронного двигателя при изменении управляющих воздействий / Г.А. Пилюгин, В.И. Пантелеев, А.Н. Филатов // Электротехнические системы и комплексы. – 2023. - № 1 (58). – С. 84-91.

69. Пилюгин, Г.А. Моделирование синхронного двигателя как активно-адаптивного элемента системы электроснабжения промышленного предприятия / Г.А. Пилюгин, В.И. Пантелеев, А.Н. Филатов // Материалы V Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности». – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2021. – С. 53-60.

70. Пилюгин, Г.А. Функциональные задачи управления процессами электроснабжения промышленного предприятия / Г.А. Пилюгин, В.И. Пантелеев, А.Н. Филатов // Материалы XIX Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективны – 2023». – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2023.–С. 3578-3581.

71. Пилюгин, Г.А. Обобщенная математическая модель системы электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами / Г.А. Пилюгин, В.И. Пантелеев, А.Н. Филатов // Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири». – Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2023. – Т. 1.–С. 347-350.

72. Попова, Е.П. Автоматизированные системы управления технологическими процессами: методическое пособие / Е.П. Попова – Краснодар: ГБПОУ КК КТК, 2015. – 44 с.

73. Постников, Н.П. Электроснабжение промышленных предприятий: Учеб. для техникумов / Н.П. Постников, Г.М. Рубашов. – 2 изд., перераб. и доп. – Л.: Стройиздат. Ленингр. отд-ние, 1989. – 352 с.

74. Радкевич, В.Н. Расчет компенсации реактивной мощности в электрических сетях промышленных предприятий: Учебно-метод. пособие по курсовому и дипломному проектированию / В.Н. Радкевич. Минск: БНТУ, 2004. – 40 с.

75. Радкевич, В.Н. Электроснабжение промышленных предприятий: учеб. пособие / В.Н. Радкевич, В.Б. Козловская, И.В. Колосова. Минск: ИВЦ Минфина, 2015. – 589 с.

76. РТМ36.18.32.6-92. Указания по проектированию установок компенсации реактивной мощности в электрических сетях общего назначения промышленных предприятий. №360-93. - М.: Тяжпромэлектропроект, 1993. – С. 22-53.

77. Савина, Н.В. Управление уровнем потерь электроэнергии в активно-адаптивных электрических сетях: учебное пособие / Н.В. Савина. – Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2014. – 114 с.

78. Савина, Н.В. Обеспечение оптимального уровня потерь электроэнергии в системах электроснабжения предприятий / Н.В. Савина, Ю.В. Мясоедов, Л.А. Мясоедова // Вестник АмГУ. Серия «Естественные и экономические науки». – 2021. - №93. – С. 61-68.

79. Савина, Н.В. Системный анализ потерь электроэнергии в распределительных электрических сетях в условиях неопределенности / Н.В. Савина: дис. ... д-р техн. наук: 05.14.02. – Иркутск, 2010. – 487 с.

80. Сальников, В.Г. Эффективные системы электроснабжения предприятий цветной металлургии / В.Г. Сальников, В.В. Шевченко. М.: Металлургия, 1986. – 320 с.

81. Свидетельство о гос. регистрации прогр. для ЭВМ №2021680084. Оценка состояния синхронного двигателя / Пантелеев В.И., Филатов А.Н.,

Пилюгин Г.А.; заявители Пантелеев В.И., Филатов А.Н., Пилюгин Г.А.; заявл. 01.12.2021, опубл. 07.12.2021.

82. Свидетельство о гос. регистрации прогр. для ЭВМ №2022680020. Программа определения уровня потерь активной мощности в системе электроснабжения промышленного предприятия с синхронными двигателя / Пилюгин Г.А., Пантелеев В.И., Филатов А.Н.; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет» (СФУ); заявл. 26.10.2022, опубл. 03.11.2022.

83. Сыромятников, И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / И.А. Сыромятников; под.ред. Л.Г. Мамиконянца; 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.

84. Туркин, Д.Г. Проектирование системы электроснабжения промышленного предприятия: учеб. пособие / Д.Г. Туркин, С.А. Щанникова, Г.П. Лю. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2009. – 192 с.

85. Указания по компенсации реактивной мощности в распределительных сетях. - М.: Энергия, 1974. - 72 с.

86. Указания по проектированию компенсации реактивной мощности в электрических сетях промышленных предприятий. М788-930. - М.: Тяжпромэлектропроект, 1984.

87. Усольцев А.А. Общая электротехника: Учебное пособие. – СПб: СПбГУИТМО, 2009. – 301 с.

88. Федоров, А.А. Учебное пособие для курсового и дипломного проектирования по электроснабжению промышленных предприятий: Учеб. пособие для вузов / А.А. Федоров, Л.Е. Старкова. – М: Энергоатомиздат, 1987. – 368 с.

89. Филатов, А.Н. Статические характеристики и методы расчета установившихся режимов работы синхронных двигателей / А.Н. Филатов, Е.Ю.

Сизганова, В.И. Пантелеев, Р.А. Петухов, Г.А. Пилюгин // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – 2015. - № 8 (6). – С. 795-801.

90. Филатов А.Н. Управление режимом реактивной мощности и напряжения промышленного предприятия / А.Н. Филатов: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03. – Красноярск, 1997. – 153 с.

91. Хабдуллин, А.Б. Разработка энергосберегающих методов оптимизации режимов работы систем электроснабжения с целью минимизации потерь мощности и нагрузки: монография / А.Б. Хабдуллин, З.К. Хабдуллина, С.А. Цырук, Н.С. Неберекутина, Ар.Б. Хабдуллин, А.У. Есжанова. Рудный: Изд-во Рудненский индустриальный институт, 2017. – 135 с.

92. Чукреев, Ю.Я. Передача электрической энергии: учебное пособие: самостоятельное учебное электронное издание / Ю.Я. Чукреев, М.Ю. Чукреев. – Сыктывкар: СЛИ, 2018. – 131 с.

93. Шварц Г.Р., Абакумов А.М., Мигачева Л.А., Рассказов Ф.Н., Кузнецов П.К. Применение регулируемого электропривода в технологиях транспорта газа и нефти. Книга 1-3, М.: Машиностроение, 2008. – 240 с.

94. Шидловский, А.К. Расчеты электрических нагрузок систем электроснабжения промышленных предприятий / А.К. Шидловский, Г.Я. Вагин, Э.Г. Куренный. М.: Энергоатомиздат, 1992. – 224 с.

95. Шупиков, П.М. Классификация состояний системы электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами / П.М. Шупиков, Г.А. Пилюгин, В.И. Пантелеев, А.Н. Филатов // Материалы XIX Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективны – 2023». – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2023. – С. 3605-3608.

96. Boglietto A., Cavagino A., Ferrari L. Induction motor equivalent circuit including the stray load losses in the machine power balance. – IEEE Transaction on Energy Conversion, 2008, vol. 23, iss. 3, p. 796-803. – Англ.

97. Collingbourne, H. The Little Book Of Delphi Programming: Learn To Program with Object Pascal / H. Collingbourne. –Amherst: Dark Neon, 2020. –194 p.

98. Georgiev, G. Research on the Impact of Regulator Functions of Power Transformers on Power Losses in Electrical Supply Systems / G. Georgiev, H. Panchev, R. Kirov // 17-th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA). – Sofia, Bulgaria: IEEE, 2021. – P. 1- 4.

99. Kelley, C.T. Solving nonlinear equations with Newton's method / C.T. Kelley. - North Carolina: SIAM, 2003. - 104 p.

100. Panteleev, V. Optimization model of power supply system of industrial enterprise/ V. Panteleev, S. Zilberman, G. Pilyugin, R. Petukhov, E. Sizganova, M. Mashukov// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. –T. 450 (№ 7).

101. Tsyganova, A.D. Algorithmization and programming / A.D. Tsyganova, V.V. Danilova. - Kostanay: KSPU, 2018. - 99 p.

**ПРИЛОЖЕНИЕ А. Условно-постоянная информация о  
высоковольтном синхронном двигателе**

Наименование приводного механизма:	мельница
Тип двигателя	ДСМ 260/39-36
Число оборотов в минуту, $n_n$ , об/мин	167
Температура охлаждающей среды, $\nu_0$ , °С	35
Номинальное значение активной мощности синхронного двигателя, $P_{2.ном}$ , кВт	900
Номинальное значение напряжения обмоток статора синхронного двигателя, $U_{1.ном}$ , кВ	6
Номинальное значение полной мощности синхронного двигателя, $S_n$ , кВ·А	1070
Номинальное значение коэффициента мощности синхронного двигателя, $\cos \varphi_n$ , о. е.	0,9
Синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси синхронного двигателя, $x_d$ , о. е.	0,673
Синхронное индуктивное сопротивление по поперечной оси синхронного двигателя, $x_q$ , о. е.	0,448
Индуктивное сопротивление Потье синхронного двигателя, $x_p$ , о. е.	0,125
Номинальное значение превышения температуры обмотки статора над температурой охлаждающей среды синхронного двигателя, $\tau_{1н}$ , °С	51
Номинальное значение превышения температуры обмотки ротора над температурой охлаждающей среды синхронного двигателя, $\tau_{2н}$ , °С	67
Номинальное значение потерь активной мощности на трение и вентиляцию	

синхронного двигателя, $p_0$ , кВт	5,2
Номинальное значение потерь активной мощности в обмотках статора	
синхронного двигателя, $p_{1.ном}$ , кВт	19,46
Номинальное значение потерь активной мощности в обмотке ротора	
синхронного двигателя, $p_{2.ном}$ , кВт	23,5
Номинальное значение потерь активной мощности в стали магнитопровода	
синхронного двигателя, $p_{3.ном}$ , кВт	22,74



**ПРИЛОЖЕНИЕ Б. План полного факторного эксперимента и результаты вычислительного эксперимента для высоковольтного синхронного двигателя**

Таблица Б.1 – Результаты оценки состояний ВСД

Опыт	$m$ , о. е.	$I_2$ , о. е.	$u$ , о. е.	$P_1$ , кВт	$Q$ , квар	$\Delta p_{сд}$ , кВт
1	0,3	0,4	0,90	296,56	-451,52	29,70
2	0,3	0,4	0,95	299,83	-577,55	32,97
3	0,3	0,4	1,00	303,79	-721,30	36,93
4	0,3	0,4	1,05	308,60	-884,11	41,75
5	0,3	0,4	1,10	314,47	-1067,44	47,61
6	0,3	0,6	0,90	294,06	-12,45	31,46
7	0,3	0,6	0,95	295,71	-124,72	33,11
8	0,3	0,6	1,00	297,90	-256,15	35,30
9	0,3	0,6	1,05	300,74	-408,23	38,14
10	0,3	0,6	1,10	304,36	-582,51	41,76
11	0,3	0,8	0,90	298,62	407,98	42,60
12	0,3	0,8	0,95	298,47	308,28	42,45
13	0,3	0,8	1,00	298,89	187,77	42,87
14	0,3	0,8	1,05	299,94	44,87	43,92
15	0,3	0,8	1,10	301,70	-122,07	45,68
16	0,3	1,0	0,90	310,52	811,43	64,02
17	0,3	1,0	0,95	307,67	722,75	61,17
18	0,3	1,0	1,00	305,66	611,48	59,16
19	0,3	1,0	1,05	304,48	475,98	57,98
20	0,3	1,0	1,10	304,17	314,56	57,67
21	0,3	1,2	0,90	331,94	1197,75	98,70
22	0,3	1,2	0,95	324,74	1118,36	91,50
23	0,3	1,2	1,00	318,90	1014,56	85,66
24	0,3	1,2	1,05	314,40	884,66	81,16
25	0,3	1,2	1,10	311,22	726,93	77,98
26	0,5	0,4	0,90	480,75	-519,06	33,89
27	0,5	0,4	0,95	483,89	-640,15	37,03
28	0,5	0,4	1,00	487,79	-779,70	40,93
29	0,5	0,4	1,05	492,61	-938,94	45,75
30	0,5	0,4	1,10	498,54	-1119,25	51,68
31	0,5	0,6	0,90	476,78	-58,92	34,18
32	0,5	0,6	0,95	478,30	-168,12	35,70
33	0,5	0,6	1,00	480,41	-296,89	37,81
34	0,5	0,6	1,05	483,21	-446,64	40,61
35	0,5	0,6	1,10	486,84	-618,89	44,24

Опыт	$m$ , о. е.	$I_2$ , о. е.	$U$ , о. е.	$P_1$ , кВт	$Q$ , квар	$\Delta p$ , кВт
36	0,5	0,8	0,90	480,91	372,64	44,89
37	0,5	0,8	0,95	480,59	275,18	44,57
38	0,5	0,8	1,00	480,89	156,64	44,87
39	0,5	0,8	1,05	481,85	15,48	45,83
40	0,5	0,8	1,10	483,55	-149,92	47,53
41	0,5	1,0	0,90	492,81	783,00	66,31
42	0,5	1,0	0,95	489,75	696,08	63,25
43	0,5	1,0	1,00	487,55	586,37	61,05
44	0,5	1,0	1,05	486,23	452,28	59,73
45	0,5	1,0	1,10	485,80	292,10	59,30
46	0,5	1,2	0,90	514,49	1174,00	101,25
47	0,5	1,2	0,95	507,01	1096,08	93,76
48	0,5	1,2	1,00	500,92	993,59	87,67
49	0,5	1,2	1,05	496,21	864,85	82,97
50	0,5	1,2	1,10	492,85	708,18	79,61
51	0,7	0,4	0,90	667,98	-626,14	41,12
52	0,7	0,4	0,95	670,76	-738,05	43,90
53	0,7	0,4	1,00	674,45	-870,06	47,59
54	0,7	0,4	1,05	679,17	-1023,06	52,31
55	0,7	0,4	1,10	685,12	-1198,20	58,26
56	0,7	0,6	0,90	661,14	-128,83	38,54
57	0,7	0,6	0,95	662,43	-233,10	39,83
58	0,7	0,6	1,00	664,39	-357,62	41,79
59	0,7	0,6	1,05	667,10	-503,69	44,50
60	0,7	0,6	1,10	670,71	-672,78	48,11
61	0,7	0,8	0,90	664,46	320,43	48,44
62	0,7	0,8	0,95	663,87	226,40	47,85
63	0,7	0,8	1,00	663,96	110,86	47,94
64	0,7	0,8	1,05	664,77	-27,65	48,75
65	0,7	0,8	1,10	666,38	-190,72	50,36
66	0,7	1,0	0,90	676,30	741,34	69,80
67	0,7	1,0	0,95	672,90	657,07	66,40
68	0,7	1,0	1,00	670,42	549,71	63,92
69	0,7	1,0	1,05	668,87	417,70	62,37
70	0,7	1,0	1,10	668,27	259,38	61,77
71	0,7	1,2	0,90	698,30	1139,38	105,05
72	0,7	1,2	0,95	690,39	1063,63	97,15
73	0,7	1,2	1,00	683,94	963,07	90,69
74	0,7	1,2	1,05	678,92	836,07	85,67
75	0,7	1,2	1,10	675,30	680,94	82,06
76	0,9	0,4	0,90	675,30	680,94	453,09

Опыт	$m$ , о. е.	$I_2$ , о. е.	$U$ , о. е.	$P_1$ , кВт	$Q$ , квар	$\Delta p$ , кВт
77	0,9	0,4	0,95	862,23	-884,94	55,37
78	0,9	0,4	1,00	865,21	-1002,70	58,35
79	0,9	0,4	1,05	869,51	-1144,54	62,65
80	0,9	0,4	1,10	875,29	-1310,80	68,43
81	0,9	0,6	0,90	847,76	-226,32	45,16
82	0,9	0,6	0,95	848,62	-322,92	46,02
83	0,9	0,6	1,00	850,28	-440,99	47,68
84	0,9	0,6	1,05	852,81	-581,59	50,21
85	0,9	0,6	1,10	856,34	-746,01	53,74
86	0,9	0,8	0,90	849,58	249,76	53,56
87	0,9	0,8	0,95	848,59	160,64	52,57
88	0,9	0,8	1,00	848,36	49,37	52,34
89	0,9	0,8	1,05	848,94	-85,43	52,92
90	0,9	0,8	1,10	850,40	-245,25	54,38
91	0,9	1,0	0,90	861,17	685,67	74,67
92	0,9	1,0	0,95	857,30	605,07	70,80
93	0,9	1,0	1,00	854,43	500,95	67,93
94	0,9	1,0	1,05	852,56	371,79	66,06
95	0,9	1,0	1,10	851,72	215,99	65,22
96	0,9	1,2	0,90	883,52	1093,43	110,27
97	0,9	1,2	0,95	875,03	1020,63	101,79
98	0,9	1,2	1,00	868,08	922,70	94,84
99	0,9	1,2	1,05	862,64	798,03	89,39
100	0,9	1,2	1,10	858,67	644,98	85,42
101	1,1	0,4	0,90	858,67	644,98	464,54
102	1,1	0,4	0,95	858,67	644,98	407,00
103	1,1	0,4	1,00	858,67	644,98	357,49
104	1,1	0,4	1,05	858,67	644,98	315,86
105	1,1	0,4	1,10	858,67	644,98	281,76
106	1,1	0,6	0,90	1037,75	-358,93	55,15
107	1,1	0,6	0,95	1037,78	-443,31	55,18
108	1,1	0,6	1,00	1038,86	-551,48	56,26
109	1,1	0,6	1,05	1041,01	-683,92	58,40
110	1,1	0,6	1,10	1044,33	-841,55	61,73
111	1,1	0,8	0,90	1036,74	158,13	60,72
112	1,1	0,8	0,95	1035,14	75,91	59,12
113	1,1	0,8	1,00	1034,45	-29,47	58,43
114	1,1	0,8	1,05	1034,68	-159,20	58,66
115	1,1	0,8	1,10	1035,91	-314,64	59,89
116	1,1	1,0	0,90	1047,73	614,85	81,23
117	1,1	1,0	0,95	1043,21	539,15	76,71

## Продолжение таблицы Б.1

Опыт	$m$ , о. е.	$I_2$ , о. е.	$U$ , о. е.	$P_1$ , кВт	$Q$ , квар	$\Delta p$ , кВт
118	1,1	1,0	1,00	1039,81	439,30	73,31
119	1,1	1,0	1,05	1037,51	313,89	71,01
120	1,1	1,0	1,10	1036,33	161,39	69,83
121	1,1	1,2	0,90	1070,36	1035,53	117,12
122	1,1	1,2	0,95	1061,12	966,57	107,88
123	1,1	1,2	1,00	1053,52	872,03	100,28
124	1,1	1,2	1,05	1047,52	750,36	94,28
125	1,1	1,2	1,10	1043,10	599,98	89,85

## ПРИЛОЖЕНИЕ В. Условно-постоянная информация об элементах системы электроснабжения

Для линии электропередач:  $l = 100$  км,  $R_0 = 0,198$  Ом/км,  $X_0 = 0,42$  Ом/км,  $B_0 = 0,0000027$  См/км;

Для трансформатора с РПН:  $S_{T.ном} = 40000$  кВ·А;  $U_{ВН.ном} = 115$  кВ;  $U_{НН.ном} = 6,3$  кВ; РПН  $9 \pm$  положений (1,78 %),  $U_{КЗ} = 11$  %,  $I_{ХХ} = 1$  %,  $\Delta P_{ХХ} = 36$  кВт,  $\Delta P_{КЗ} = 172$  кВт;

Для участка токопровода:

1 участок магистрального токопровода:  $l = 0,1$  км,  $R_0 = 0,129$  Ом/км,  $X_0 = 0,071$  Ом/км,

2 участок магистрального токопровода:  $l = 0,2$  км,  $R_0 = 0,129$  Ом/км,  $X_0 = 0,071$  Ом/км,

3 участок магистрального токопровода:  $l = 0,2$  км,  $R_0 = 0,129$  Ом/км,  $X_0 = 0,071$  Ом/км,

1 участок радиального токопровода (участок токопровода представлен токоограничивающим реактором):  $n = 1$  шт.,  $R_0 = 0,01$  Ом,  $X_0 = 0,35$  Ом,

2 участок радиального токопровода (участок токопровода представлен токоограничивающим реактором):  $n = 1$  шт.,  $R_0 = 0,01$  Ом,  $X_0 = 0,35$  Ом,

3 участок радиального токопровода (участок токопровода представлен токоограничивающим реактором):  $n = 1$  шт.,  $R_0 = 0,01$  Ом,  $X_0 = 0,35$  Ом;

Для узла нагрузки:

1 узел нагрузки:  $m = 0,5$  о.е.,  $n_{СД} = 4$  шт.,  $P_{кн} = 150$  кВт,  $Q_{кн} = 75$  квар,

2 узел нагрузки:  $m = 0,7$  о.е.,  $n_{СД} = 2$  шт.,  $P_{кн} = 50$  кВт,  $Q_{кн} = 25$  квар,

3 узел нагрузки:  $m = 0,9$  о.е.,  $n_{СД} = 3$  шт.,  $P_{кн} = 100$  кВт,  $Q_{кн} = 50$  квар;

Для центра питания:  $U_{GS} = 115$  кВ;

Для сетей ВН и НН:  $U_{ВН} = 115$  кВ,  $U_{НН} = 6,3$  кВ.

**ПРИЛОЖЕНИЕ Г. План полного факторного эксперимента и результаты вычислительного эксперимента  
для системы электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами**

Таблица Г.1 – Параметры режимов работы системы электроснабжения

Опыт	$I_2$ , о. е.	$R$ , отп	$U_2$ , кВ	$P_{27}$ , кВт	$Q_{27}$ , квар	$U_1$ , кВ	$P_{17}$ , кВт	$Q_{17}$ , квар	$P_{10}$ , кВт	$Q_{10}$ , квар	$\Sigma\Delta p_i + \Sigma\Delta p_j$ , кВт	$\Sigma\Delta p_{сд,j}$ , кВт	$\Delta p_T$ , кВт	$\Delta p_0$ , кВт	$\Sigma\Delta p$ , кВт
1	0,6	6	6,6	6510,7	5794,4	112,9	6554,1	6401,1	6684,4	6677,5	50,4	377,2	43,4	130,3	601,2
2		9	6,3	6507,4	4482,7	113,2	6549,3	5050,3	6654,9	5274,4	45,8	378,5	41,9	105,6	571,8
3		12	6,0	6514,9	3346,1	113,5	6555,9	3888,8	6645,2	4078,3	43,8	388,0	41,0	89,3	562,1
4		15	5,6	6533,8	2402,9	113,7	6574,4	2931,3	6653,7	3099,6	44,2	406,5	40,6	79,4	570,6
5		18	5,4	6553,1	1890,6	113,8	6593,5	2413,8	6668,9	2573,7	45,9	424,1	40,4	75,4	585,8
6	0,7	6	6,6	6488,0	3934,4	113,4	6529,4	4488,1	6626,1	4693,3	38,1	391,9	41,4	96,7	568,1
7		9	6,3	6484,9	2583,6	113,7	6525,5	3112,7	6605,6	3282,7	35,7	391,3	40,6	80,1	547,6
8		12	6,0	6492,7	1408,6	113,9	6532,9	1925,4	6603,7	2075,5	35,8	398,9	40,2	70,8	545,7
9		15	5,7	6511,9	427,6	114,1	6552,0	940,6	6618,6	1081,9	38,5	415,4	40,1	66,6	560,6
10		18	5,4	6543,0	-342,4	114,3	6583,2	172,1	6649,0	311,5	43,5	441,6	40,2	65,7	591,0
11	0,8	6	6,6	6487,1	2151,6	113,8	6527,5	2675,2	6603,7	2836,7	30,8	430,9	40,4	76,1	578,3
12		9	6,3	6484,9	766,8	114,1	6525,0	1279,8	6592,3	1422,5	31,0	428,6	40,1	67,3	566,9
13		12	6,0	6493,7	-440,8	114,3	6533,8	72,2	6598,5	209,4	33,9	434,4	40,2	64,7	573,2
14		15	5,7	6513,9	-1453,2	114,5	6554,5	-933,6	6620,6	-793,1	39,5	449,1	40,5	66,2	595,3
15		18	5,4	6546,2	-2254,1	114,7	6587,1	-1724,7	6656,9	-1576,6	47,4	473,4	40,9	69,8	631,6
16	0,9	6	6,7	6507,4	443,1	114,1	6547,5	956,0	6614,1	1097,2	27,8	494,3	40,1	66,6	628,8
17		9	6,4	6506,4	-971,5	114,4	6546,8	-455,7	6611,9	-317,5	30,9	490,3	40,3	65,1	626,7
18		12	6,1	6516,8	-2206,9	114,7	6557,6	-1679,2	6626,6	-1532,8	37,1	494,4	40,9	69,0	641,4
19		15	5,8	6538,8	-3245,2	114,9	6580,4	-2700,7	6656,3	-2539,7	46,1	507,4	41,6	75,9	671,1
20		18	5,4	6572,9	-4070,9	115,0	6615,3	-3508,4	6699,2	-3330,4	57,7	530,0	42,4	83,9	714,0
21	1,0	6	6,7	6548,1	-1194,0	114,5	6588,5	-675,2	6654,8	-534,6	28,5	582,0	40,5	66,3	717,2
22		9	6,4	6548,8	-2634,7	114,8	6590,0	-2099,9	6661,9	-1947,3	34,9	576,4	41,2	71,9	724,3
23		12	6,1	6561,1	-3893,8	115,0	6603,3	-3335,6	6685,2	-3161,8	44,6	578,9	42,2	81,9	747,6
24		15	5,8	6585,4	-4953,4	115,2	6628,7	-4368,7	6722,7	-4169,2	57,5	590,3	43,3	94,0	785,1
25		18	5,5	6622,1	-5798,2	115,4	6666,5	-5187,7	6772,6	-4962,5	73,3	611,3	44,4	106,1	835,0

**ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Оценка состояния синхронного двигателя»**

**РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ**



**СВИДЕТЕЛЬСТВО**

о государственной регистрации программы для ЭВМ

**№ 2021680084**

**Оценка состояния синхронного двигателя**

Правообладатели: *Пантелеев Василий Иванович (RU), Филатов Алексей Николаевич (RU), Пилюгин Геннадий Александрович (RU)*

Авторы: *Пантелеев Василий Иванович (RU), Филатов Алексей Николаевич (RU), Пилюгин Геннадий Александрович (RU)*



Заявка № **2021669630**

Дата поступления **01 декабря 2021 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **07 декабря 2021 г.**

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Г.П. Излиев

**ПРИЛОЖЕНИЕ Е. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа определения уровня потерь активной мощности в системе электроснабжения промышленного предприятия с синхронными двигателями»**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**СВИДЕТЕЛЬСТВО**  
о государственной регистрации программы для ЭВМ  
**№ 2022680603**

**Программа определения уровня потерь активной мощности в системе электроснабжения промышленного предприятия с синхронными двигателями**

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет» (СФУ) (RU)*

Авторы: *Пилюгин Геннадий Александрович (RU), Пантелеев Василий Иванович (RU), Филатов Алексей Николаевич (RU)*

Заявка № **2022680020**  
Дата поступления **26 октября 2022 г.**  
Дата государственной регистрации  
в Реестре программ для ЭВМ **03 ноября 2022 г.**



Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности  
  
Ю.С. Zubov



**ПРИЛОЖЕНИЕ Ж. Акт об использовании результатов  
диссертационной работы**

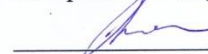
Общество с ограниченной ответственностью  
«СЦМ»  
660075, Россия,  
г. Красноярск, ул. Маерчака, ЗД 8/1  
Почтовый адрес:  
660075, г. Красноярск, а/я 12797  
ИНН 2460090208  
КПП 246001001

ООО  
«СЦМ»

19.01.2024 № 14/1  
На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

**УТВЕРЖДАЮ**

Генеральный директор ООО «СЦМ»

 А.Ю. Южанников

**АКТ**

об использовании результатов диссертационной работы Пилюгина Г.А.  
«Обоснование эффективности использования высоковольтных синхронных  
двигателей для снижения потерь активной мощности в системах  
электрооборудования промышленных предприятий»

Настоящим актом подтверждается принятие к использованию результатов диссертационного исследования Пилюгина Геннадия Александровича «Обоснование эффективности использования высоковольтных синхронных двигателей для снижения потерь активной мощности в системах электрооборудования промышленных предприятий», в частности:

- методику оценки состояния высоковольтного синхронного двигателя для технико-экономического обоснования его использования в качестве источника реактивной мощности;
- математическую модель обобщенной системы электрооборудования промышленного предприятия с высоковольтными синхронными двигателями для оценки уровня потерь активной мощности во всех элементах системы при различных ее состояниях;
- программу «Программа оценки уровня потерь активной мощности в системе электрооборудования промышленного предприятия с синхронными двигателями (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ (№20222680603 от 03.11.2022)).

Использование указанных результатов позволит уточнить методику проектирования систем электрооборудования промышленных предприятий, имеющих в своем составе высоковольтные синхронные двигатели, которые могут быть использованы для компенсации реактивной мощности, прогнозировать уровень потерь активной в системах электрооборудования промышленных предприятий, и решать задачи классификации и оптимизации режимов работы систем электрооборудования промышленных предприятий.

Генеральный директор,  
к.т.н., доцент



А.Ю. Южанников

Исп.  
Филатов А.Н.  
8-953-590-76-63  
ANF.24@MAIL.RU

**ПРИЛОЖЕНИЕ II. Акт об использовании результатов  
диссертационной работы в учебном процессе**



СИБИРСКИЙ | SIBERIAN  
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ | FEDERAL  
УНИВЕРСИТЕТ | UNIVERSITY

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего  
образования  
"Сибирский федеральный университет"  
Политехнический институт

660074, Красноярский край,  
г. Красноярск, ул. Киренского, д. 26  
телефон: (391) 291-20-50  
<http://polytech.sfu-kras.ru>,  
e-mail: [pi@sfu-kras.ru](mailto:pi@sfu-kras.ru)

ОКПО 02067876; ОГРН 1022402137460;  
ИНН/КПП 2463011853/246301001



«УТВЕРЖДАЮ»

Директор

Политехнического института СФУ

д.т.н., профессор

«13» \_\_\_\_\_ 2024 г

М.В. Первухин

**АКТ**

об использовании в учебном процессе результатов диссертационной работы  
Пилогина Г.А. «Обоснование эффективности использования высоковольтных синхронных  
двигателей для снижения потерь активной мощности в системах электроснабжения  
промышленных предприятий»

В Политехническом институте СФУ на кафедре «Электроэнергетика», начиная с 2023 г., внедрены в учебный процесс результаты диссертационной работы при непосредственном участии старшего преподавателя Г.А. Пилогина, а именно:

1. Методика, алгоритм и программа оценки состояния высоковольтного синхронного двигателя в лекционном курсе и лабораторных занятиях по дисциплине «Математическое моделирование элементов систем электроснабжения».

2. Алгоритм и программа для оценки уровня потерь активной мощности в системе электроснабжения промышленного предприятия с активными элементами в лекционном курсе и практических занятиях по дисциплине «Режимы работы электрооборудования систем электроснабжения».

Были выполнены с использованием программного обеспечения указанного в пунктах 1 и 2 выпускные квалификационные работы уровня бакалавриата и магистратуры направления подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника в 2023 году.

Результаты внедрения способствуют улучшению качества подготовки специалистов-электроэнергетиков по указанным дисциплинам.

Зав. кафедрой «Электроэнергетика»  
ПИ СФУ, д.т.н., профессор

В.И. Пантелеев

Заместитель директора по  
учебной работе ПИ СФУ,  
к.т.н., доцент

И.А. Капошко