## Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева»

На правах рукописи

#### Непша Федор Сергеевич

# ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ УГОЛЬНЫХ ШАХТ ПРИ ОПТИМАЛЬНОМ РЕГУЛИРОВАНИИ НАПРЯЖЕНИЯ

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: кандидат технических наук, старший научный сотрудник Ефременко В.М.

### ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ5
1. НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ
НАПРЯЖЕНИЯ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ УГОЛЬНЫХ
ШАХТ11
1.1. Обзор исследований в области управления режимом напряжения в системах электроснабжения
•
1.2. Задачи регулирования напряжения в системах электроснабжения
угольных шахт
1.3. Анализ изменения уровня напряжения и потребления в системах
электроснабжения угольных шахт
1.4. Существующий алгоритм регулирования напряжения
1.5. Особенности использования технических средств регулирования
напряжения на угольных шахтах Кузбасса
1.6. Влияние отклонения напряжения от номинального уровня на режим
потребления угольной шахты
1.7. Выводы
2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОТРЕБЛЕНИЯ АКТИВНОЙ И
РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ
УГОЛЬНЫХ ШАХТ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ НАПРЯЖЕНИЯ49
2.1. Исследование статических характеристик и регулирующих эффектов
нагрузки шахтовых асинхронных двигателей по напряжению
2.1.1. Общие сведения
2.1.2. Алгоритм определения статических характеристик нагрузки
асинхронных двигателей по напряжению51
2.1.3. Задание кривых намагничивания асинхронных двигателей 56
2.1.4. Анализ статических характеристик и регулирующих эффектов
нагрузки шахтовых асинхронных двигателей по напряжению 58
2.2. Исследование эквивалентных статических характеристик нагрузки по
напряжению для участков системы электроснабжения
2.2.1. Алгоритм определения эквивалентных статических характеристик
нагрузки по напряжению в системе электроснабжения 62

2.2.2. Влияние ПУПП на уровень потерь активной и реактивной мощности	6
2.2.3. Определение эквивалентных статических характеристик нагрузки по напряжению для ПУПП	
2.3. Определение обобщенных статических характеристик СЭС угольной шахты	
2.3.1. Особенности изменения уровня потерь активной мощности в силовых трансформаторах	4
2.3.2 Обобщенные статические характеристики СЭС угольной шахты по напряжению	3
2.4. Выводы по главе 3	5
3. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОПТИМАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ УГОЛЬНЫХ ШАХТ 87	
3.1. Формулирование целевой функции оптимизации уровня напряжения по критерию минимума потерь активной мощности	7
3.2. Алгоритм определения оптимального уровня напряжения 89	9
3.2.1. Подготовка исходных данных	2
3.2.2. Выбор метода расчета установившегося режима работы СЭС угольной шахты94	4
3.2.3. Описание зависимых переменных, изменяемых в процессе оптимизации	1
3.2.4. Формирование матрицы состояний сети	3
3.2.5. Оптимизация значений недискретных переменных	5
3.3. Разработка алгоритмического обеспечения блока автоматического регулирования УРПН	0
3.3.1. Задачи регулирования при использовании блока автоматического регулирования	0
3.3.2. Алгоритм регулирования напряжения	2
3.4. Выводы по главе 2	8
4. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ОПТИМАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ УГОЛЬНЫХ ШАХ	Γ
4.1. Выбор среды моделирования и оптимизации	

4.2. Предъявляемые требования и структура разработанной программы	1.122
4.3. Разработка тестовой схемы СЭС угольной шахты	126
4.4. Сравнение двух методов оптимизации: метода SQP и метода внутренней точки	130
4.5. Оценка экономического эффекта оптимального регулирования уро напряжения	
4.6. Предлагаемая реализация оптимального регулирования напряжени рамках SCADA-систем угольных шахт	
4.7. Выводы по главе 4	139
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	141
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	143
Приложение 1	156
Приложение 2	160
Приложение 3	165
Приложение 4	175
Приложение 5	182
Приложение 6	184

#### **ВВЕДЕНИЕ**

**Актуальность темы исследования.** При добыче, транспортировке и переработке угля затраты на электроэнергию могут достигать до 25%, что обуславливает необходимость разработки мероприятий по снижению потерь электроэнергии.

Разработка этих мероприятий предусмотрена «Долгосрочной программой развития угольной промышленности на период до 2030 года», утвержденной распоряжением Правительства РФ от 21.06.2014 №1099-р. Их реализация должна обеспечить снижение электроэнергетической составляющей себестоимости угля и повысить его конкурентоспособность на рынке.

Существует множество способов снижения потерь электроэнергии в системе электроснабжения (СЭС) угольных шахт. Одним из наиболее эффективных способов является оптимальное регулирование напряжения. Критерием эффективности такого регулирования является минимизация потерь электроэнергии при условии соблюдения нормативных отклонений напряжения на зажимах электроприемников.

Существующая концепция регулирования напряжения в СЭС угольных шахт базируется на регулировании напряжения на шинах главной понизительной подстанции (ГПП) и управлении потоками реактивной мощности. По причине невзаимосвязанного использования средств регулирования напряжения данная концепция не позволяет обеспечить оптимальный уровень напряжения во всех точках сети и минимизировать потери электроэнергии.

Научные исследования, проведенные Б.Н. Абрамовичем, Е.А. Конюховой, Д.М. Тарасовым, А.П. Шевчуком и др. показали, что для реализации эффективного управления режимом напряжения необходимо учитывать статические характеристики электродвигателей по напряжению.

В связи с вышесказанным, разработка алгоритма оптимального регулирования напряжения с учетом статических характеристик шахтовых электродвигателей представляет собой актуальную научно-техническую задачу, решение которой может снизить уровень потерь электроэнергии и повысить энергоэффективность СЭС угольных шахт Кузбасса.

Степень разработанности темы исследования. Проблемой создания систем оптимального регулирования напряжения в СЭС промышленных предприятий и распределительных сетях, в том числе вопросами определения статических характеристик и регулирующих эффектов нагрузки по напряжению, занимались Б.Н. Абрамович, В.В. Полищук, Ю.С. Железко, Е.А. Конюхова, Д.М. Тарасов, А.П. Шевчук, Р.Р. Насыров, А.В. Малафеев, Е.И. Жмак, Г.И. Ивонин, А.Б. Хабдуллин, J.-F. Canard, R. Caire, G. Rami, О. Richardot и др.

Несмотря на значительный объем проведенных исследований, разработанные системы регулирования напряжения не адаптированы для применения в СЭС угольных шахт и не позволяют взаимосвязано задействовать все имеющиеся средства регулирования напряжения (СМ, БСК, трансформаторы с УРПН и др.) для снижения потерь электроэнергии.

Одной из причин отсутствия подобных систем регулирования в СЭС угольных шахт является отсутствие уточненных статических характеристик и регулирующих эффектов нагрузки по напряжению для электродвигателей При горно-шахтного оборудования. современного ЭТОМ шахтовые электродвигатели имеют более тяжелые условия работы и пуска по электродвигателями общепромышленного сравнению исполнения. Следовательно, ранее полученные статические характеристики нагрузки по напряжению для двигателей общепромышленного исполнения не могут быть использованы для описания шахтовых электродвигателей.

**Цель работы** заключается в повышении энергоэффективности подземной добычи угля при оптимальном регулировании напряжения в СЭС угольной шахты.

**Идея работы** состоит в разработке алгоритма регулирования напряжения, обеспечивающего снижение уровня потерь активной энергии за счет эффективного использования устройств регулирования напряжения с учетом статических характеристик нагрузки электроприемников по напряжению.

#### Основные задачи исследования:

- 1. Исследовать перспективы и особенности использования средств регулирования напряжения в СЭС угольных шахт Кузбасса.
- 2. Разработать алгоритм определения статических характеристик нагрузки асинхронных двигателей (АД) по напряжению и с его помощью оценить влияние параметров шахтовых АД на потребление активной и реактивной мощности при изменении уровня напряжения.
- 3. Выполнить анализ влияния параметров пассивных элементов СЭС угольной шахты на потери активной и реактивной мощности при изменении уровня напряжения.
- 4. Разработать алгоритм оптимизации уровня напряжения в СЭС угольной шахты.
- 5. Для оценки эффективности разработанного алгоритма регулирования построить имитационную модель СЭС угольной шахты.

#### Научная новизна работы:

- 1. Разработан алгоритм определения коэффициентов полинома статических характеристик нагрузки АД по напряжению, отличающийся от существующих использованием Т-образной схемы замещения АД с одновременным учетом кривых намагничивания и механических характеристик нагрузки.
- 2. Уточнены статические характеристики и регулирующие эффекты нагрузки шахтовых АД по напряжению.
- 3. Получены зависимости относительного изменения потерь активной и реактивной мощности в пассивных элементах СЭС угольной шахты от напряжения при изменении их загрузки и параметров.

4. Предложен алгоритм оптимального регулирования напряжения в СЭС угольной шахты по критерию минимума потерь активной мощности, отличающийся от известных алгоритмов возможностью оптимизации дискретных и недискретных параметров устройств регулирования напряжения с учетом статических характеристик нагрузки по напряжению.

**Теоретическая и практическая значимость.** Результаты оценки влияния параметров АД и элементов СЭС угольной шахты на уровень потребления активной и реактивной мощности могут быть использованы при разработке мероприятий по повышению энергоэффективности угольных шахт Кузбасса.

Разработанная имитационная модель СЭС угольной шахты может быть использована при разработке рекомендаций по регулированию напряжения в СЭС угольных шахт с целью снижения потерь активной энергии.

Полученные результаты могут быть использованы при развитии концепции «умных сетей электроснабжения» (SmartGrid) в рамках СЭС промышленных предприятий, в том числе при наличии объектов распределенной генерации.

Методология и методы исследования. Проведенные исследования основывались на общих положениях теории электрических цепей, аналитическом методе исследования функциональных зависимостей, методе Ньютона, методе последовательного квадратичного программирования, методе внутренней точки и имитационном моделировании.

#### Научные положения, выносимые на защиту:

- 1. Учет статических характеристик нагрузки по напряжению в дополнение к существующим принципам централизованного регулирования напряжения позволяет обеспечить оптимальный уровень напряжения в СЭС угольных шахт.
- 2. Характер изменения потерь активной и реактивной мощности в трансформаторах с УРПН при регулировании напряжения определяется коэффициентом их загрузки, при этом потери реактивной мощности от

коэффициента трансформации зависят линейно, а потери активной мощности нелинейно.

3. При регулировании напряжения с целью снижения потерь активной мощности в СЭС угольных шахт должна учитываться взаимосвязь режимов работы используемых дискретных и недискретных средств регулирования напряжения.

Достоверность научных положений и выводов, сформулированных в диссертационной работе, обеспечивается применением современных математических методов оптимизации и расчета электрических режимов с последующей экспериментальной проверкой теоретических выводов на имитационной модели СЭС угольной шахты, построенной на основании фактических данных о нагрузках сети, полученных по показаниям приборов учета.

**Личный вклад автора** заключается в выполнении основного объема исследований, изложенных в работе, в обработке, анализе, обобщении полученных результатов, формулировке выводов и в личном участии в апробации результатов исследования и подготовке основных публикаций по выполненной работе.

Реализация выводов и рекомендаций работы. Полученные теоретические и практические результаты работы используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «КузГТУ» для подготовки бакалавров и магистров по направлению «Электроэнергетика и электротехника» и рекомендованы к использованию в работе Филиала ПАО «МРСК Сибири» - «Кузбассэнерго – РЭС».

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на XV Международной научно-практической конференции «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири» (Кемерово, 2014 г.), IV Международном форуме «Интеллектуальные энергосистемы» (Томск, 2017 г.), XLVI Международной научно-практической конференции с элементами научной школы «Фёдоровские чтения – 2017» (Москва, 2017 г.),

Международной научно-практической конференции «Перспективные технологии добычи и переработки твердых полезных ископаемых» (Кемерово, 2017 г.), II Всероссийской молодежной научно-практической конференция «Экологические проблемы промышленно развитых и ресурсодобывающих регионов: пути решения» (Кемерово, 2017 г.) и др.

**Публикации.** Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 15 печатных работах, из них 6 в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень, рекомендованный ВАК Министерства образования и науки РФ, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 115 наименований. Работа изложена на 184 страницах машинописного текста и содержит 51 рисунок, 11 таблиц и 6 приложений.

# 1. НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ УГОЛЬНЫХ ШАХТ

# 1.1. Обзор исследований в области управления режимом напряжения в системах электроснабжения

Ha системообразующей сети, проблемы уровне связанные регулированием напряжения всегда занимали центральную позицию. Их посвящены работы многих отечественных ученых: решению Л.А. Крумма, Л.А. Мелентьева, В.И. Идельчика, В.А. Арзамасцева, В.М. Марковича, Я.Д. Баркана и др. Однако регулирования напряжения в распределительных сетях стала затрагиваться совсем недавно. Связано это с тем, что распределительные сети 6-10 кВ (в том числе системы электроснабжения (СЭС) промышленных предприятий) технически оснащены хуже, чем системообразующие сети. С точки зрения классической концепции функционирования распределительных сетей, нет необходимости в оснащении всей СЭС телеизмерениями и телемеханикой для обеспечения напряжения во всех точках сети в пределах допустимых значений. Информации об изменении нагрузки и топологии сети достаточно для того, чтобы предвидеть выход напряжения за допустимые диапазоны и принять меры. Однозначное направление перетоков в сети позволяет с высокой точностью выполнять расчеты уровня напряжения, даже не прибегая к специальным программным комплексам. Кроме того, учитывая наличие на главной понизительной подстанции (ГПП) и трансформаторных подстанциях (ТП) устройств регулирования под нагрузкой (УРПН) и переключения без возбуждения (ПБВ) возможно обеспечить напряжение в заданных пределах при достаточно большом диапазоне колебания нагрузки. используются устройства автоматического регулирования напряжения трансформаторов (АРНТ) или устройства ПБВ ТП 6(10)/0,4 кВ.

При этом полученные режимы работы сети в большинстве случаев не соответствуют оптимальным и устройства регулирования напряжения не всегда используются эффективным образом.

В России под руководством профессора Б.Н. Абрамовича предложена общая структура интеллектуальной энергетической системы предприятия минерально-сырьевого комплекса [1]. Она включает в себя традиционную генерацию и альтернативные возобновляемые источники энергии, которые позволяют недискретно регулировать уровень напряжения и компенсации реактивной мощности. Следовательно, В разрабатываемых системах необходимо регулирования напряжения, учитывать ИХ возможное подключение.

Вопросу оптимизации уровня напряжения по критерию обеспечения нормативного уровня напряжения у наибольшего возможного потребителей посвящена работа Р.В. Насырова [2]. В этой работе система активно-адаптивного регулирования напряжения, обеспечивающая поддержание напряжения В заданных пределах использованием устройств АРНТ. Однако такая схема регулирования только в классических распределительных применима сетях, направление перетоков мощности однозначно, и не используются средства компенсации реактивной мощности. Кроме того, в данной работе не учитывается критерий минимума потерь (потребления) активной мощности.

В работе А.В. Малафеева [3] предложен метод оптимального распределения активной и реактивной мощности между генераторами собственных станций промышленных предприятий, также разработан метод оптимального регулирования напряжения путем изменения положения УРПН силовых трансформаторов. Однако в данной работе не учитываются статические характеристики нагрузки по напряжению.

В рамках диссертации Е.И. Жмак [4] предложено решение задачи регулирования напряжения в электроэнергетических системах на основе нечеткой логики, а также обоснована целесообразность применения методов

нечетких вычислений в задачах регулирования напряжения электроэнергетических систем. Однако задача регулирования напряжения решается только по критерию обеспечения нормативного уровня напряжения.

В работе Д.М. Тарасова [5] разработан алгоритм и структура комплекса технических средств управления коэффициентом трансформации силового трансформатора с использованием УРПН при групповом управлении (ЦП) напряжением В центре питания cучетом параметров электроприемников и распределительных линий, который позволяет осуществить минимизацию потерь активной и реактивной мощности в предложенный реальном времени. Однако алгоритм обеспечивает регулирование только коэффициента трансформации трансформаторов ГПП. Другие устройства регулирования напряжения не задействуются.

В работе А.П. Шевчука [6] рассматривается вопрос применения нечеткой логики для работы блоков автоматического регулирования РПН (БАР РПН). С использованием фаззи-логической системы управления осуществляется групповое управление режимом напряжения в соответствие с рациональным уровнем напряжения путем изменения коэффициента трансформации силового трансформатора. При этом в сети соблюдаются требования по качеству электрической энергии. Было достигнуто снижение потерь активной мощности на 9-11% по сравнению с системой встречного регулирования напряжения.

В вышеуказанных работах не учитывается наличие недискретных источников реактивной мощности, которые могут быть представлены в виде синхронных машин.

За рубежом существует множество работ, посвященных вопросу повышения энергоэффективности СЭС с недискретными источниками реактивной мощности. Основными задачами этих работ является разработка систем управления устройствами регулирования напряжения, которые позволяют обеспечить максимально эффективное использование малой

генерации (в том числе возобновляемых источников энергии), а также повысить энергоэффективность СЭС.

В работе J.-F. Canard [7] показано, что в присутствии малой генерации, регулирование напряжения с использованием устройств АРНТ по принципам «стабилизация напряжения» и «встречное регулирование» не может применяться и требует существенной доработки.

Raphael Caire в рамках своей диссертации [8] предложил использовать малую генерацию для нормализации уровня напряжения в сети. Для решения задачи оптимизации уровня напряжения было предложено сочетание двух алгоритмов: детерминированного и эвристического (генетические алгоритмы). Однако использование этих алгоритмов в реальном времени затруднено в связи с их низкой сходимостью. В работе также был предложен метод оптимизации размещения объектов малой энергетики.

В работе G. Rami [9] предложено оснастить объекты малой генерации активно-адаптивным регулятором, принцип которого строится переключении между режимом регулирования P/Q в нормальном режиме, и P/U в режиме, близком к граничному. Для оптимизации режима по критерию обеспечения нормативного уровня напряжения у наибольшего возможного числа потребителей, такого подхода вполне достаточно. Сначала определяется некий «промежуточный» диапазон напряжения (Umin désiré «минимальное желаемое напряжение» - Umax désiré «максимальное желаемое напряжение»). Если напряжение находится в этих пределах, то считается нормальным. В случае режим выхода напряжения «промежуточный» диапазон, режим считается «критическим». «Промежуточный» диапазон напряжения определяется в зависимости от режима на базе алгоритма с использованием нечеткой логики. Схема регулирования напряжения по данной системе представлена на рисунках 1.1-1.2. Однако предлагаемый метод не ставит целью выполнение оптимизации режима работы сети по критерию минимума потерь (потребления) электроэнергии в СЭС, что существенно снижает его эффективность.

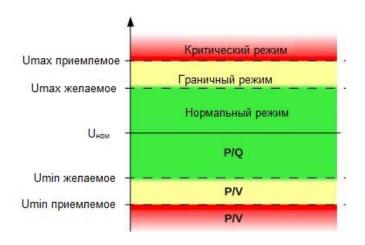


Рисунок 1.1 – Регулирование напряжения. Пороги регулирования

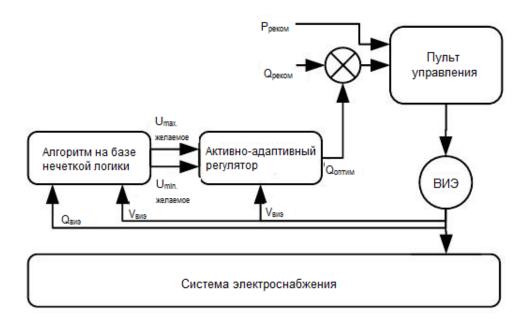


Рисунок 1.2 – Общая схема активно-адаптивного регулирования, предложенная G. Rami

Olivier Richardot предложил своей диссертации [10] схему регулирования координированного напряжения c использованием (D-RCT). децентрализованной генерации Принцип регулирования напряжения в этой системе состоит в регулировании реактивной мощности. Это регулирование детерминировано алгоритмом оптимизации, цели которого состоят в следующем:

– поддержание напряжения в «пилотных» узлах. Основная задача при регулировании по этой системе – определить «пилотные» узлы, в

которых напряжение должно поддерживаться в определенных пределах. В работе предложен алгоритм минимизации количества «пилотных» узлов;

- управление реактивной мощностью. В работе предложена методика по снижению отклонения генерируемой реактивной мощности между объектами распределенной генерации;
  - поддержание напряжения на зажимах объектов малой генерации.

Однако в рамках промышленного предприятия применение метода с «пилотными» узлами в системообразующей сети невозможно по причине отсутствия влияния промышленных предприятий на Системного оператора или энергоснабжающую организацию. В задачи Системного оператора не проблемы решение оптимизации режима входит промышленных предприятий, энергоснабжающей организации снижение потерь (потребления) активной мощности у потребителей невыгодно. Схема системы D-RCT представлена на рисунке 1.3.

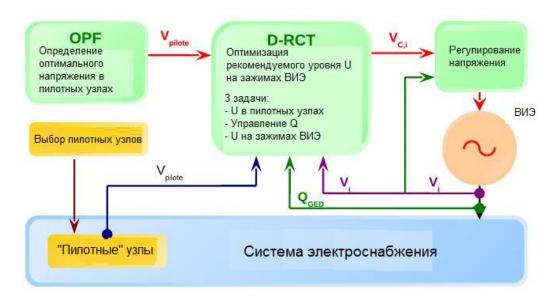


Рисунок 1.3 – Схема регулирования D-RCT

Рассмотренные в зарубежных работах системы регулирования соответствуют концепции VVC (Volt VAr Control «Контроль напряжения, реактивной мощности»), подразумевающей использование существующих в сети средств регулирования напряжения и реактивной мощности для

снижения потерь электроэнергии и обеспечения нормативного уровня напряжения. В настоящее время эта концепция является наиболее эффективной для реализации оптимального регулирования напряжения в СЭС [11].

Необходимо отметить, что в рассмотренных работах нет системы регулирования, позволяющей учесть наличие недискретных источников реактивной мощности (синхронных машин), батарей статических конденсаторов (БСК), трансформаторов с УРПН и использовать их одновременно для регулирования напряжения с целью снижения потерь (потребления) активной энергии.

### 1.2. Задачи регулирования напряжения в системах электроснабжения угольных шахт

В диссертационной работе в качестве объекта исследования рассматривается электротехнический комплекс угольных шахт, которые являются одними из основных потребителей электрической энергии в Кузбассе.

Электротехнический комплекс угольных шахт содержит в своем составе передвижные подземные участковые подстанции (ПУПП), присоединенное к ним технологическое оборудование и получает питание от главной понизительной подстанции (ГПП), которая подключена к энергоснабжающей организации посредством ВЛ 35 - 110 кВ.

Технологическое оборудование комплекса подразделяется на очистное и проходческое оборудование, оборудование общей и местной вентиляции, оборудование шахтного транспорта и поверхностного технологического комплекса; стационарное оборудование. Распределительные линии электротехнического комплекса являются радиально-магистральными, характеризуются значительной протяженностью и разветвленностью.

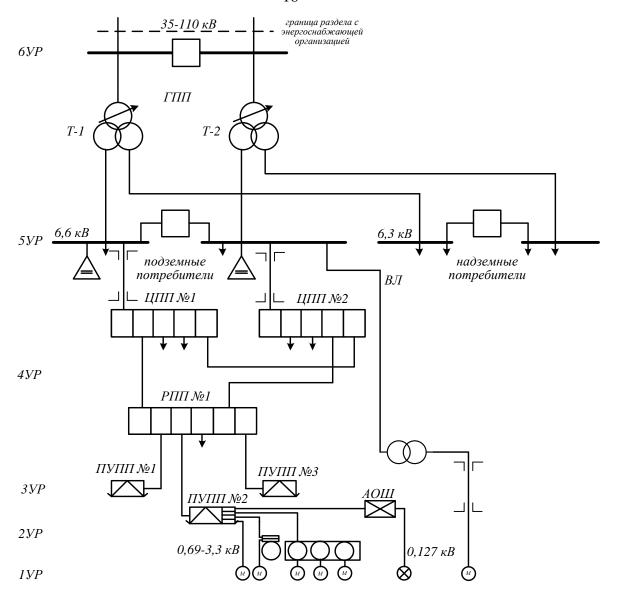


Рисунок 1.4 – Структура СЭС угольной шахты

Согласно иерархической схеме электроснабжения [12] система электроснабжения (СЭС) угольной шахты включает себя несколько уровней (рисунок 1.4):

- первый уровень (1УР) отдельные электроприемники очистные комбайны, забойные конвейера, перегружатели, дробилки, насосные станции лавы, ленточный конвейер конвейерного штрека, осветительные установки и пр.
  - второй уровень (2УР) магнитные станции, магнитные пускатели;
  - третий уровень (ЗУР) шины низкого напряжения ПУПП;

- четвертый уровень (4УР) шины ПУПП или распределительных подземных пунктов (РПП);
  - пятый уровень (5УР) шины ГПП;
- шестой уровень (6УР) граница раздела балансовой принадлежности между угольной шахтой и энергоснабжающей организацией.

Регулирование напряжения на вышеуказанных уровнях СЭС угольной шахты сводится к обеспечению выполнения следующих задач:

1. Обеспечение нормативного уровня напряжения. Для нормальной работы любого электротехнического устройства важно обеспечить требуемый уровень напряжения на зажимах электроприемников.

В настоящее время требования к качеству электрической энергии устанавливаются ГОСТ 32144-2013. Согласно данному стандарту положительные и отрицательные отклонения напряжения в точке передачи электрической энергии (на уровне 6УР) не должны превышать 10 % номинального или согласованного значения напряжения.

Энергоснабжающая организация несет ответственность только за уровень напряжения в точке передачи электроэнергии. Поэтому в СЭС угольной шахты должны быть обеспечены условия, при которых отклонения напряжения на зажимах электроприемников не превышают допустимых значений при условии соблюдения нормативных требований к уровню напряжения в точке передачи электрической энергии. При этом допустимые значения напряжения на зажимах электродвигателей нормируются ГОСТ ІЕС 60034-1-2014. который выделяет две допустимые 30НЫ работы электродвигателя: зона А (±5% от номинального напряжения), зона Б (±10%) от номинального напряжения).

2. Обеспечение минимума потерь (потребления) электроэнергии в шахтовой сети. Решение этой задачи подразумевает управление напряжением в СЭС таким образом, чтобы при выполнении задачи обеспечения нормативного уровня напряжения снизить уровень потребления (потерь) активной мощности на границе раздела с энергоснабжающей

организацией и тем самым обеспечить снижение затрат на приобретение электроэнергии.

Как показывают теоретические и практические исследования, проведенные в России, США и других странах [13-15] в среднем, при снижении напряжения на 1% среднее снижение потребления электроэнергии составило 0,76% для промышленных предприятий.

При этом понижение напряжения на 10% приводит к уменьшению потребления электроэнергии на 10-30% и фактически не влияет на технологический процесс, если напряжение у наиболее удаленных электроприемников в период максимума нагрузки не ниже минимально допустимого. Аналогичные результаты для других предприятий и регионов изложены в [15-16].

Значительное потребления влияние напряжения уровень на электроэнергии протяженных во многом вызвано наличием распределительных сетей И значительного недогруженных числа трансформаторов и асинхронных двигателей [17].

Структура электротехнического комплекса, состав нагрузок и характерные особенности технологического процесса угольной шахты формируют особые требования к задачам обеспечения нормативного уровня напряжения и минимума потерь (потребления) электроэнергии в шахтовой сети.

Невыполнение задачи обеспечения нормативного уровня напряжения влечет за собой отклонение показателей качества электроэнергии от допустимых значений и создает неблагоприятные условия эксплуатации, что может привести к нарушению электроснабжения и, как следствие, существенным экономическим ущербам. Невыполнение задачи обеспечения минимума потерь (потребления) электроэнергии приводит к существованию в СЭС неоптимальных и неэкономичных режимов, росту потребления электроэнергии и, как следствие, росту электроэнергетической составляющей себестоимости добычи угля.

Для оценки степени выполнения задач регулирования требуется выполнение анализа изменения уровня напряжения и работы устройств регулирования напряжения в СЭС угольной шахты.

## 1.3. Анализ изменения уровня напряжения и потребления в системах электроснабжения угольных шахт

В качестве объекта исследования выбрана СЭС угольной шахты АО «Шахта им. С.М. Кирова». Схема внешнего электроснабжения шахты, включает в себя ВЛ 35 кВ, подключенные к ПС 110 кВ Заречная, которая получает питание от транзитных ВЛ 110 кВ. Схема внешнего электроснабжения шахты им. С.М. Кирова представлена на рисунке 1.5.

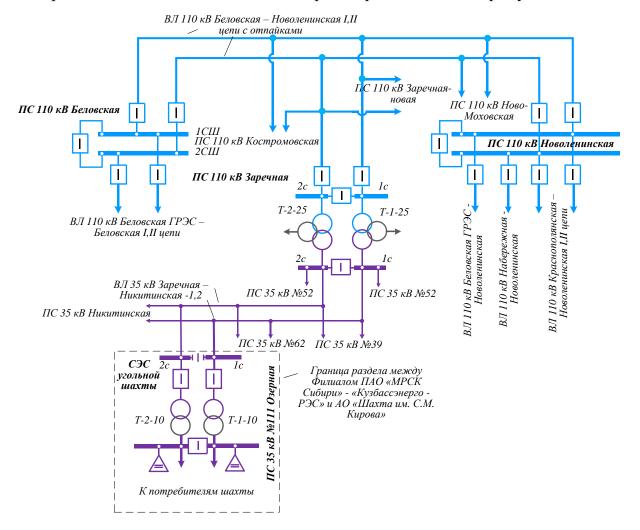


Рисунок 1.5 – Схема внешнего электроснабжения АО «Шахта им. С.М. Кирова»

Схема внутреннего электроснабжения (рисунок 1.6) ограничена вводами передвижных участковых подземных подстанций (ПУПП), получающих питание от РПП №110 и РПП №112.

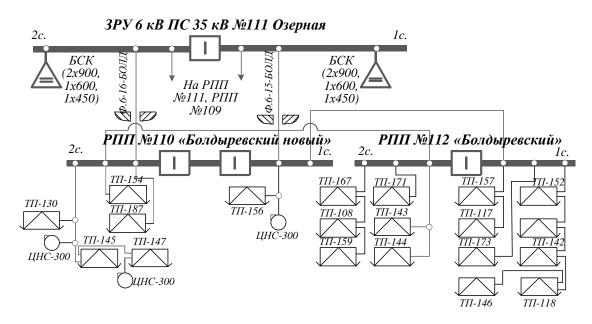


Рисунок 1.6 – Схема внутреннего электроснабжения шахты АО «Шахта им. С.М. Кирова»

Материалом для исследования послужили данные телеизмерений в СЭС 6 кВ и в питающей сети 35-110 кВ. Данные включают в себя информацию о токовых нагрузках, напряжении, уровнях потребления активной и реактивной мощностей.

На рисунке 1.7 приведены графики среднечасовых электрических нагрузок ПС 35 кВ №111 Озерная, которые были получены в период зимнего и летнего контрольных замеров электроэнергии.

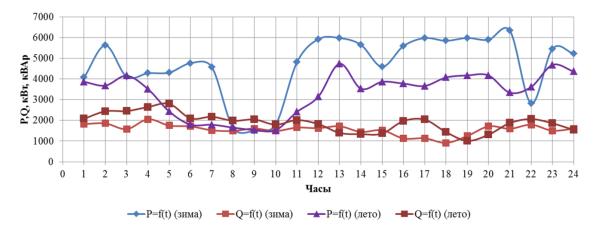


Рисунок 1.7 – График электрических нагрузок ПС 35 кВ №111 Озерная

Рисунок 1.7 показывает, что графики электрических нагрузок в летний и зимний период имеют схожий характер. Поскольку шахта функционирует круглосуточно (4 рабочие смены) на графике можно наблюдать локальные минимумы нагрузки в 3-00, 9-00, 15-00, 22-00. В утренние часы производится остановка очистного оборудования (ремонтная смена), что приводит к значительному снижению уровня потребления. Потребление реактивной мощности из сети остается практически неизменным, что вызвано наличием устройств компенсации реактивной мощности на шинах 6 кВ ГПП, которые обеспечивают поддержание tgф, согласованного с энергоснабжающей организацией.

На рисунке 1.8 представлен график изменения уровня напряжения с дискретизацией 15 минут в день зимнего и летнего контрольных замеров.

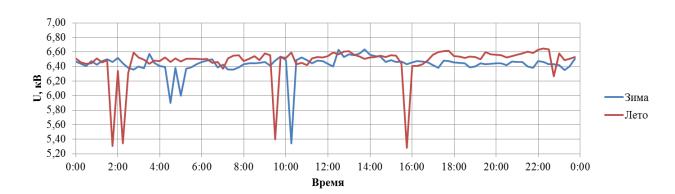


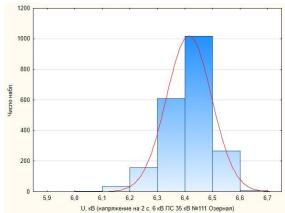
Рисунок 1.8 – График изменения уровня напряжения на секциях 6 кВ ПС №111 Озерная

По виду графиков можно сделать вывод, что уровень напряжения в течение суток колебается в одних и тех же пределах в зимний и летний период.

Анализ графиков изменения уровня напряжения и потребления в СЭС выполнялся с использованием методов математической статистики на базе программного комплекса STATISTICA 12 [18,19].

На первом этапе выполнен анализ процесса изменения уровня напряжения на шинах 6-110 кВ за декабрь 2016 и май 2017 года. По

результатам анализа данных с использованием критерия Смирнова-Колмогорова установлено, что напряжение в узловых точках сети 6-110 кВ на 15-минутном интервале подчиняется нормальному закону распределения. Распределения частот для напряжений на стороне 6-35 кВ ПС 35 кВ №111 Озерная представлены на рисунках 1.9-1.10. Отметим, что в указанные периоды не было аварийных ситуаций, связанных со значительным понижением уровня напряжения.



5,9 6,0 6,1 6,2 6,3 6,4 6,5 6,6 6,7 U, кВ (напряжение на 2 с. 6 кВ ПС 35 кВ №111 Озерная)
 34,0 34,5 35,0 35,5 36,0 36,5 37,0 37,5 38,0 U, кВ (напряжение на 2 с. 35 кВ ПС 35 кВ №111 Озерная)
 Рисунок 1.9 — Распределение частот напряжений на 2 с. 6 кВ ПС 35 кВ
 №111 Озерная
 №111 Озерная

1600

1200

1000

600

Для нормального закона распределения вероятность того, что случайная величина напряжения отклонится более чем на  $3\sigma_U$  и не превышает 0,25%. Результаты статистического анализа изменения уровня напряжения и токовой нагрузки в сети 6-110 кВ приведены в таблицах 1.1-1.2.

Таблица 1.1 – Результаты статистического анализа изменения уровня напряжения СЭС угольной шахты АО «Шахта им. С.М. Кирова» и питающей сети (декабрь 2016/май 2017)

п/п	Наименование узла	$U_{ m cp}$ , к ${ m B}$	$σ_U$ , κ $B$	$\sigma_U, \%$	Предельное фактическое отклонение напряжения $\pm \Delta U/U_{\text{ном}}$ , %
1	Шины 110 кВ ПС Заречная	112/113	1,219/1,55	±1,1/±1,4	-2,4 ÷ (+3,6)/ -2,2 ÷ (+3,7)
2	Шины 35 кВ ПС Заречная	36,2/37,1	0,4/0,51	±1,15/±1, 45	-2,6 ÷ (+4,3)/ -2,8 ÷ (+4,1)
3	1 с.ш. 35 кВ ПС №111 Озерная	37,92/37,21	0,43/0,581	±1,2/±1,7	-6,0 ÷ (+5,2)/ -5,7 ÷ (+4,8)
4	2 с.ш. 35 кВ ПС №111 Озерная	36,45/35,9	0,43/0,476	±1,2/±1,3	-5,8 ÷ (+4,5)/ -5,7 ÷ (+4,3)
5	1 с.ш. 6 кВ ПС №111 Озерная	6,39/6,38	0,149/0,22	±2,36/±3,	-16,9 ÷ (+6,2)/ -16,3 ÷ (+5,8)
6	2 с.ш. 6 кВ ПС №111 Озерная	6,43/6,27	0,095/0,148	±1,5/±2,4	-15,7 ÷ (+5,6)/ -13,6 ÷ (+5,4)

Таблица 1.2 – Результаты статистического анализа изменения токовой нагрузки угольной шахты АО «Шахта им. С.М. Кирова» (декабрь 2016/май 2017)

<b>№</b> п/п	Наименование узла	I <sub>cp</sub> , A	$\sigma_I$ , A	σ <sub>I</sub> , %	I <sub>макс</sub> , A
1	Токовая нагрузка 1 с.ш. 6 кВ ПС №111 Озерная	129,3/257,83	60,1/123,3	±46,4/±47,8	581,5/658,4
2	Токовая нагрузка 2 с.ш. 6 кВ ПС №111 Озерная	158,2/198,97	57,8/77,44	±36,5/±39,1	814,1/823,4

Данные таблиц 1.1-1.2 позволяют сделать следующие выводы:

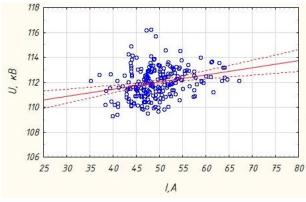
1. Стандартное отклонение напряжения увеличивается по мере приближения к электроприемникам с резкопеременной нагрузкой. При этом

стандартное отклонение напряжения на 1 с.ш. 6 кВ ПС №111 Озерная больше, чем на 2 с.ш. 6 кВ ПС №111 Озерная. Это связано с тем, что через 1 с.ш. 6 кВ ПС №111 Озерная получает питание очистной комплекс 7LS20 мощностью 715 кВт, а через 2 с.ш. 6 кВ ПС №111 Озерная получает питание очистной комплекс меньшей мощности (4LS20 - 445 кВт). В связи с этим, стандартное отклонение токовой нагрузки 1 с.ш. 6 кВ ПС №111 Озерная больше стандартного отклонения токовой нагрузки на 2 с.ш. 6 кВ ПС №111 Озерная.

- 2. Уровень напряжения в СЭС угольной шахты изменяется в широких пределах. Диапазон одиночных отклонений напряжения может достигать -16,9 ÷ (+6,2)%. Это связано с периодическими пусками и реверсами двигательной нагрузки угольной шахты.
- 3. Реализация встречного регулирования напряжения на ПС 110 кВ Заречная будет неэффективной т.к. нормальные отклонения напряжения на шинах 35-110 кВ ПС 110 кВ Заречная не превышают величины шага ступени регулирования УРПН Т-1(2)-25 ПС Заречная 1,78%. При этом ПС 110 кВ Заречная также осуществляет питание ООО «Шахта «Заречная» (шины 6 кВ ПС 110 кВ Заречная) и нагрузку селитебного типа (ПС 35 кВ Никитинская), динамика которой не коррелирует с динамикой изменения нагрузки ПС 35 кВ №111 Озерная.

Анализ корреляции уровня напряжения и уровня нагрузки, приложенной к соответствующим узлам, представлен в виде диаграмм рассеяния.

Диаграммы рассеяния для значений нагрузки ПС 110 кВ Заречная и напряжения на шинах 110 кВ ПС Заречная, а также для нагрузки ПС 35 кВ №111 Озерная и напряжения на шинах 6 кВ представлены на рисунках 1.11-1.12.



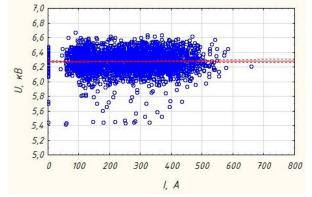


Рисунок 1.11 – Диаграмма рассеяния для напряжения на шинах 110 кВ ПС Заречная и нагрузки ПС Заречная

Рисунок 1.12 – Диаграмма рассеяния для напряжения на шинах 6 кВ и нагрузки ПС №111 Озерная

Результаты анализа показывают, что между уровнем напряжения и нагрузки ПС 110 кВ Заречная имеется слабая корреляционная связь (коэффициент детерминации  $R^2$ =0,292).

Корреляционная связь между уровнем напряжения на шинах 6 кВ ПС **№**111 Озерная И нагрузкой практически отсутствует (коэффициент детерминации  $R^2$ =0,012), что свидетельствует об отсутствии встречного регулирования, т.к. встречное регулирование подразумевает увеличение уровня напряжения при увеличении величины токовой нагрузки [25]. Иными словами в СЭС угольной шахты не выполняется регулирование напряжения в зависимости от величины нагрузки. При этом параметры устройств регулирования неизменными. В связи остаются необходимость оптимального использования **устройств** регулирования напряжения, находящихся в зоне ответственности угольной шахты. Отметим, что нормальное отклонение напряжения на шинах 6 кВ ГПП достигает ±3,5%  $U_{HOM}$ , следовательно, возможно осуществлять регулирование напряжения, используя 4 ступени регулирования УРПН (при диапазоне регулирования  $\pm 9x1,78\%$ ).

Проведенный анализ послеаварийных режимов, связанных с отключениями в системообразующей сети показывает, что с учетом данных таблицы 1.1 снижение напряжения в СЭС может достигать 20-25% [26]. При

этом возможно нарушение работы двигательной нагрузки угольной шахты, в том числе остановка объектов жизнеобеспечения (вентилятор главного проветривания, водоотлив и пр.).

Таким образом, задача обеспечения нормативного уровня напряжения на зажимах электроприемников в нормальных и послеаварийных режимах не всегда выполняется.

Отметим, что в условиях роста энерговооруженности угольных шахт Кузбасса, колебания напряжения на зажимах электроприемников будут значительнее, что связано с более широким диапазоном изменения токовой нагрузки.

#### 1.4. Существующий алгоритм регулирования напряжения

Существующий алгоритм регулирования напряжения в СЭС угольной шахты представлен на рисунке. 1.13.

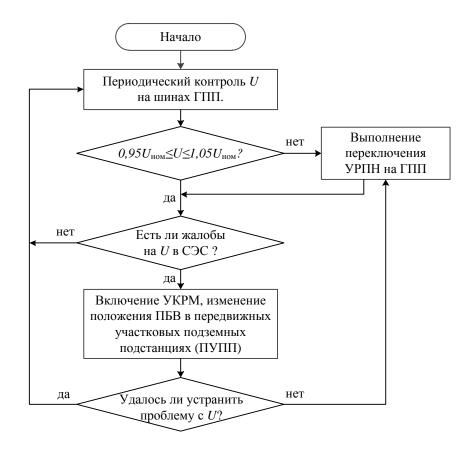


Рисунок 1.13 – Существующий алгоритм регулирования напряжения в СЭС угольной шахты

В СЭС угольных шахт Кузбасса регулирование напряжения выполняется вручную посредством изменения положения анцапфы УРПН на ГПП или путем (включения) отключения устройств компенсации реактивной мощности (УКРМ) [26].

На шинах 6 кВ ГПП выполняется контроль напряжения. В случае если напряжение входит в диапазон  $\pm 5\%$  от  $U_{\text{ном}}$  и при этом происходит нарушение технологического процесса на отдельных электроприемниках (останов очистного комплекса, конвейера и т.п.), тогда в первую очередь выполняется регулировка уровня напряжения с использованием местных средств регулирования (ПБВ, УКРМ). В случае отклонения напряжения на величину более чем  $\pm 5\%$  от номинального значения принимается решение о переключении ступени регулирования УРПН на ГПП. Переключение может выполняться в ручном или дистанционном режиме. Если это не позволяет нормализовать технологический процесс, то производится переключение ступени регулирования УРПН. Отметим, что при выполнении регулирования напряжения, обратная связь по напряжению между электроприемниками и регуляторами осуществляется человеком, что сказывается на быстродействии и правильности принимаемых решений.

В представленном алгоритме использование соответствующего устройства регулирования четко не определено и практически обосновано только практическим опытом. Также при регулировании не учитывается критерий минимума потерь активной мощности в СЭС. Исходя из этого, можно сделать вывод, что устройства регулирования напряжения в СЭС угольных шахт Кузбасса используются нерациональным образом [26].

## 1.5. Особенности использования технических средств регулирования напряжения на угольных шахтах Кузбасса

Проведенный анализ нормативно-технической литературы и принципиальных схем электроснабжения угольных шахт Кузбасса позволил

составить структурную схему размещения устройств регулирования напряжения в СЭС угольных шахт (рисунок 1.14).

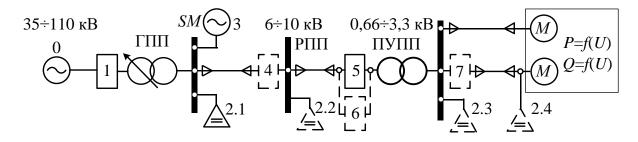


Рисунок 1.14 — Структурная схема размещения устройств регулирования напряжения в СЭС угольных шахт

Под номером 0 на рисунке 1.14 отмечена точка присоединения угольной шахты к сети, график изменения напряжения в которой, задается энергоснабжающей организацией с учетом режима работы системообразующей сети 110-500 кВ.

На рисунке 1.14 обозначены следующие средства регулирования напряжения: 1 — УРПН с устройствами автоматического регулирования напряжения трансформаторов (АРНТ); 2.х — устройства централизованной (2.1), групповой (2.2 — 2.3) и индивидуальной компенсации реактивной мощности (2.4); 3 — синхронные машины; 4 — вольтодобавочные трансформаторы (ВДТ); 5 — устройства ПБВ; 6 — УРПН ПУПП; 7 — установки продольной компенсации (УПК) и тиристорные регуляторы напряжения (ТРН).

Штриховыми линиями отмечены устройства регулирования напряжения, которые не встречаются в СЭС угольных шахт Кузбасса, но могут быть рекомендованы к применению при наличии соответствующих обоснований [27].

Для выявления особенностей регулирования напряжения был проведен анализ работы технических средств регулирования напряжения в СЭС угольных шахт Кузбасса.

Устройства РПН трансформаторов ГПП. В Кузбассе насчитывается 34 действующих шахты, которые получают питание от 25 ПС 110 кВ и 24 ПС 35 кВ. Из действующих шахт 16 получают питание от ПС 110 кВ, 12 – от ПС 35 кВ, 6 – от ПС 35-110 кВ. На главных понизительных подстанциях используются, правило, двухобмоточные трансформаторы как УРПН. трансформаторы c расщепленными обмотками, оснащенные Принципы работы УРПН подробно описаны в [20-23].

В соответствии с п. 2.9.16 [20], а также п. 2.10.16 [21] УРПН комплектуется устройством автоматического регулирования напряжения трансформатора (АРНТ), снабженным устройством для ручного и автоматического управления уставкой напряжения. УРПН должно иметь счетчик числа переключений, который позволяет оценивать его остаточный ресурс и планировать текущий ремонт УРПН.

Как показал анализ, среди устройств АРНТ, используемых на ГПП угольных шахт, наиболее распространены устройства советского производства (АРТ-1М, АРТ-1Н, БАУРПН, БАУРПН-2). На новых трансформаторах (16%) применяются современные микропроцессорные устройства АРНТ (KVGC 202, PHM-1 и пр.).

В настоящее время устройства АРНТ на всех подстанциях 35-110 кВ Кемеровской области, питающих угольные переведены шахты, неавтоматический режим, что противоречит требованиям п. 5.3.6[24], т.к. не на всех подстанциях колебания напряжения находятся в пределах, удовлетворяющих требования потребителей. Переключения ступеней регулирования УРПН выполняются вручную с проведением обязательного контроля сопротивления (процесс переключения занимает до 4-6 часов) контактов УРПН или дистанционно (процесс переключения занимает до 30 минут). Дистанционное переключение ступени регулирования УРПН осуществляется со щита управления с помощью ключа управления [28].

Многолетний опыт эксплуатации [25] показал, что УРПН достаточно надежны и следует стремиться к наиболее полному использованию их

возможностей. Уже в 70-е годы XX века УРПН с автоматическим управлением хорошо себя зарекомендовали, и вывод УРПН из автоматического режима в настоящее время может быть обоснован только неудовлетворительным состоянием УРПН по результатам диагностики.

Использование устройств АРНТ без предварительной диагностики УРПН может представлять опасность. В процессе эксплуатации УРПН возможно появление следующих дефектов: нарушение герметичности между баком трансформатора и баком контактора, подгарание контактов из-за ослабления контактного нажатия и увеличение сопротивления контактов.

Применению УРПН в автоматическом режиме на угольных шахтах также может препятствовать неправильная работа устройств АРНТ в условиях резкопеременной нагрузки.

Таким образом, одной из особенностей регулирования напряжения в СЭС **УГОЛЬНЫХ** шахт Кузбасса использование УРПН является неавтоматическом режиме, что связано cразличными причинами: неудовлетворительное эксплуатационное состояние УРПН [27], отсутствие у настройке устройства АРНТ, нерациональность персонала опыта по алгоритма работы устройства АРНТ, вызывающего быстрый контактов, боязнь отказа УРПН. В последнем случае УРПН может не использоваться даже в дистанционном режиме, что приводит к существенной задержке при выполнении мероприятий по регулированию напряжения (переключение УРПН занимает 0,5-4 часа) и исключает возможность оперативного регулирования напряжения в аварийных и послеаварийных режимах.

Стоит отметить, что эксплуатация УРПН в фиксированном положении ведет к повреждениям подвижных и неподвижных контактов вследствие увеличения переходного сопротивления из-за образования полупроводящей оксидной пленки на контактных поверхностях [28].

*Батареи статических конденсаторов (БСК)*. Регулирование уровня напряжения в узлах распределительной сети не ограничивается

использованием УРПН с устройствами АРНТ. Батареи статических конденсаторов (БСК), воздействуя на баланс реактивной мощности в точке его подключения, также приводят к изменению уровня напряжения. Установка БСК вблизи потребителей реактивной мощности уменьшает полную мощность нагрузки этих потребителей. Это приводит к изменению баланса реактивной мощности и, как следствие, к изменению уровней напряжения в сети. В шахтовых сетях БСК, как правило, подключаются к шинам 6 кВ ГПП (рисунок 1.15).

Из рисунка 1.15 (а, б) видно, что часть реактивной составляющей мощности нагрузки Q компенсируется мощностью, генерируемой БСК  $Q_{\kappa}$ , что снижает реактивную мощность, потребляемую из сети. Следовательно, снижаются потери напряжения в элементах сети, питающих данную нагрузку.

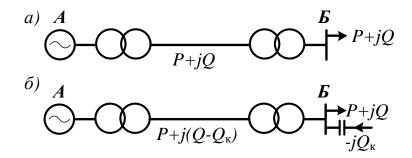


Рисунок 1.15 – Схема присоединения БСК

При наличии компенсации потери напряжения определяются по формуле:

$$\Delta U_{\kappa} = \frac{PR + (Q - Q_{\kappa})X}{U_{\mu}},\tag{1.1}$$

Вследствие того, что реактивная мощность О изменяется в течение суток, генерируемая реактивная мощность должна быть регулируемой. По БСК этой причине состоит, правило, как ИЗ нескольких секций конденсаторных батарей, имеющих общую систему управления. Управление такой установкой подразумевает подключение или отключение

параллельных ветвей (секций), что соответствует увеличению или уменьшению суммарной реактивной мощности БСК.

По результатам анализа использования БСК в СЭС угольных шахт Кузбасса было выявлено, что автоматическое управление БСК выполняется только по критерию обеспечения нормативного tg (26). Поэтому при снижении напряжения ниже допустимого уровня и при обеспечении необходимого tgo, автоматического включения БСК не происходит. Оперативному персоналу главной понизительной подстанции приходится вручную выполнять включение ступеней БСК, что при изменении уровня напряжения в питающей сети может привести к резкому скачку напряжения на шинах 6 кВ ГПП. При этом, даже в случае использования БСК на шинах подстанции автоматическом режиме ПО критерию поддержания определенного напряжения, эффект от регулирования будет незначительным, напряжения В шахтовой сети останутся Т.К. потери практически неизменными. Ранее подобные решения связывались с отсутствием БСК взрывозащищенного исполнения. Однако в настоящее время выпускаются установки конденсаторные рудничные взрывобезопасного типа (УКРВ), размещение которых возможно непосредственно на подземных распределительных пунктах (РПП) [29]. Особенно актуально их применение в условиях роста энерговооруженности электроприемников в подземных выработках.

Устройства ПБВ. Принцип работы устройств ПБВ подробно описан в [23, 25]. В зависимости от мощности, напряжения и схемы регулировочных ответвлений обмоток В трансформаторах применяют различные конструкции переключающие устройства ПБВ. В СЭС угольных шахт Кузбасса устройства ПБВ используются на передвижных участковых подземных подстанциях ПУПП. Число ступеней регулирования составляет ±2x2,5%. В процессе перемещения энергопоезда положение ступени устройства ПБВ обеспечения регулирования может изменяться ДЛЯ При ПБВ уровня напряжения. переключение нормативного ЭТОМ

производится при отключенном трансформаторе и может занимать до 4 часов.

Синхронные двигатели. Повышение напряжения на зажимах СД приводит к снижению его располагаемой мощности вследствие увеличения реактивной составляющей холостого хода двигателя [30].

Располагаемая реактивная мощность  $Q_{\rm pc}$  и потери активной мощности  $\Delta P$  являются функциями коэффициента m загрузки статора синхронного двигателя (СД) и напряжения на его зажимах:

$$Q_{pc} = f(m,U); \Delta P = (\psi, m, U), \qquad (1.2)$$

где  $m = P/P_{\rm H}$  — относительная величина потребляемой СД активной мощности;  $\psi = Q/Q_{\rm H}$  — относительная величина генерируемой или потребляемой реактивной мощности; U — относительная величина напряжения на зажимах двигателя. Практически значения m могут изменяться от 0,05 (режим, близкий к холостому ходу СД) до 1,1 и  $\psi$  от - 0,6 (режим потребления реактивной мощности) до  $\psi_{\rm pc}$  (относительная величина располагаемой СД реактивной мощности при рассматриваемых значениях U и m) [31].

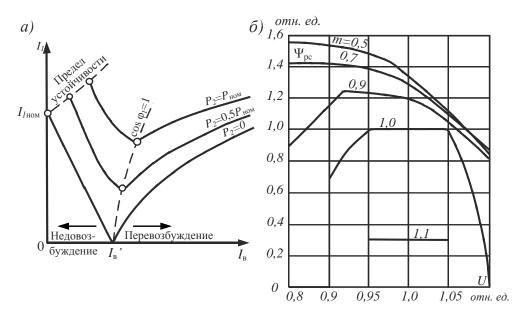


Рисунок 1.16 - U-образная характеристика (а) и зависимость изменения относительной величины располагаемой СД реактивной мощности (б) от напряжения на зажимах двигателя U

На рисунке 1,16, *а* представлена *U*-образная характеристика синхронной машины. Из нее следует, что изменяя величину тока возбуждения, появляется возможность регулировать коэффициент мощности двигателя. При этом в режиме перевозбуждения СД выдает реактивную мощность в сеть, а в режиме недовозбуждения потребляет.

На рисунке 1,16,  $\delta$  представлены зависимости изменения относительной величины располагаемой СД реактивной мощности от коэффициента загрузки двигателя по активной мощности m при различных значениях напряжения на зажимах двигателя U.

Таким образом, при постоянстве активной мощности СД, которая определяется его загрузкой, регулировать реактивную мощность СД можно изменением напряжения и изменением тока возбуждения.

Отметим, что на угольных шахтах Кузбасса синхронные машины не используются для компенсации реактивной мощности и регулирования напряжения.

Синхронные генераторы. Генераторы функционируют параллельно с сетью, и осуществляет выдачу электрической энергии на шины 6 кВ ГПП, питающей СЭС угольной шахты. Выдаваемая в сеть активная мощность  $P_{z}$ , определяется количеством энергоносителя подаваемого турбину. на Диапазон выдаваемой реактивной мощности определяется нагрузочной диаграммой генератора (P-Q диаграмма), а также значением тока в обмотке возбуждения генератора. Нагрузочная диаграмма в общем виде представлена на рисунке. 1.17. Нагрузочная диаграмма характеризует собой диапазон реактивной мощности  $[Q_{min}, Q_{max}]$ , в котором может изменяться генерируемая (потребляемая) реактивная поддержания мощность ДЛЯ заданного напряжения на зажимах генератора.

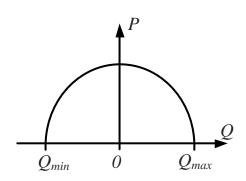


Рисунок 1.17 – Нагрузочная диаграмма генератора

Влияние генератора на уровень потребления активной и реактивной мощности в СЭС угольной шахты определяется его местом подключения. При подключении генератора на шины 6 кВ ГПП его влияние на потребление активной и реактивной мощностей определяется выдачей активной мощности в сеть, степенью загрузки силовых трансформаторов и его влиянием на уровень напряжения в шахтовой сети. За счет плавного регулирования выдачи реактивной мощности, генератор позволяет точно обеспечить уровень напряжения на шинах ГПП, необходимый для минимизации уровня потребления активной и реактивной мощностей.

В Кузбассе на шахте имени С.М. Кирова (АО «СУЭК Кузбасс») используются две контейнерные ТЭС на шахтном метане. Они обеспечивает шахту тепловой и электрической энергией. Номинальная мощность каждой установки составляет 1,5 МВт. Среднечасовая генерация электроэнергии составляет около 900 кВт·ч, что составляет 15% от общей нагрузки шахты.

Согласно «Долгосрочной программе развития угольной 2030 промышленности на период года» [33],утвержденной ДΟ распоряжением Правительства РФ от 21.06. 2014 №1099-р планируется стимулирование использования угледобывающими предприятиями отрасли возобновляемых источников энергии и развитие генерации с использованием метана угольных пластов.

Отметим, что особенностью угольных шахт, отличающей их от прочих потребителей, является наличие у них объектов жизнеобеспечения, относящихся к особой группе I категории по надежности электроснабжения,

которые в соответствии с требованиями п. 1.2.19 ПУЭ должны иметь третий независимый источник питания. На шахтах Кузбасса третий независимый источник питания отсутствует, при этом вопрос его реализации является весьма важным [34].

Наряду с существующими средствами регулирования напряжения необходимо рассмотреть устройства регулирования напряжения, использование которых может быть рекомендовано при наличии оснований и должном развитии технологий.

Устройства динамической компенсации реактивной мощности (ДКРМ). Устройства ДКРМ позволяют обеспечить необходимую реактивную мощность при запусках И самозапусках двигателей. 3a счет быстродействующих тиристорных ключей устройство ДКРМ генерирует в сеть необходимую реактивную мощность при провалах напряжения, тем самым поддерживая его необходимый уровень. В настоящее время эти устройства получают широкое распространение в СЭС промышленных предприятий [35].

Вольтодобавочные трансформаторы (ВДТ). Принцип работы ВДТ, применяемых в распределительных сетях, подробно описан в [36]. В отличие от УРПН трансформаторов ГПП ВДТ имеют меньший шаг регулирования (0,625 %) и обладают меньшим временем переключения (0,35 с.). В настоящее время номинальный ток выпускаемых ВДТ достигает до 500 A, что делает возможным их применение для осуществления группового регулирования напряжения на участках СЭС угольных шахт.

Устройства РПН трансформаторов ПУПП. Применение устройства РПН на трансформаторах ПУПП может быть обосновано в случае невозможности обеспечения нормативного уровня напряжения на зажимах электроприемников при использовании средств централизованного регулирования напряжения [27]. В настоящее время ПУПП с устройствами РΠН выпускаются. При ПУПП используются не ЭТОМ сухие трансформаторы, в которых возможно применение только тиристорных УРПН. Существующие тиристорные УРПН подробно рассмотрены в [37-38]. В настоящее время ведутся работы по интеграции тиристорных УРПН в трансформаторы распределительных сетей 6-20 кВ [39]. Однако данные трансформаторы еще не запущены в серийное производство.

Установка продольной компенсации (УПК). Принципы продольной компенсации реактивной мощности подробно описаны в [40]. Главное назначение УПК – компенсация реактивного сопротивления участков СЭС. Главным достоинством УПК является зависимость их регулирующего эффекта от величины нагрузки, что делает их практически идеальными для использования в качестве индивидуального регулятора напряжения для мощных угледобывающих комбайнов и конвейеров [27]. Тем не менее с появлением регулируемого электропривода эффект от применения УПК значительно снижается по причине уменьшения диапазона колебаний напряжения.

Отметим, что включение УПК приводит к увеличению токов КЗ во всех элементах сети, что опасно для кондесаторов УПК т.к. приводит к росту напряжения на зажимах УПК при возникновении КЗ.

Тиристорные (TPH).Вопросы регуляторы напряжения индивидуального регулирования с использованием тиристорных регуляторов рассматривались в работе Г.И. Ивонина [41]. В данной работе были оценены способы улучшения качества напряжения на зажимах мощных шахтовых АД в условиях протяженных низковольтных сетей подземных участков. В качестве основных способов улучшения напряжения качества внедрение тиристорных регуляторов рассматривались напряжения и одноступенчатое автоматическое повышения напряжения до  $1,2 \div 1,5 U_{\text{ном}}$  для обеспечения требуемых характеристик в пусковых и перегрузочных режимах.

Однако конкретных конструкций вышеуказанных устройств регулирования напряжения (ДКРМ, ВДТ, ПУПП с тиристорными УРПН,

УПК, ТРН), предназначенных для шахтных условий, в настоящее время не существует.

Отметим, что рекомендации по вопросам применения конкретных устройств местного регулирования напряжения в настоящее время отсутствуют. При этом, как отмечается в [27], применение любого группового и индивидуального регулятора напряжения на участке угольной шахты требует технико-экономического обоснования.

# 1.6. Влияние отклонения напряжения от номинального уровня на режим потребления угольной шахты

Каждый электроприемник спроектирован для работы при номинальном напряжении и должен обеспечивать нормальное функционирование при отклонениях напряжения от номинального на заданную величину. При изменении напряжении в пределах этого диапазона изменяются технические показатели и уровень потребления активной и реактивной мощности[42].

Зависимость уровня потребления активной и реактивной мощности от напряжения определяется статической характеристикой нагрузки по напряжению. При малых отклонениях напряжения она может быть охарактеризована регулирующим эффектом нагрузки по напряжению. Регулирующим эффектом нагрузки по напряжению называют изменение потребляемой мощности электроэнергии в процентах при изменении напряжения на один процент [43].

Рассмотрим влияние отклонения напряжения на режим потребления отдельных электроприемников угольной шахты.

Электроосветительные приборы. На угольных шахтах применяются осветительные установки с лампами накаливания, люминесцентными (ЛСР) и светодиодными лампами (СЗВ). Доля осветительной нагрузки на современных шахтах составляет около 1-3%. В связи с этим, влияние осветительной нагрузки на уровень потребления активной и реактивной

мощности в СЭС угольных шахт может не рассматриваться.

Асинхронные двигатели (АД). На рисунке 1.18 приведена Т-образная схема замещения АД [44]. Эта схема отображает сопротивление статора и ротора двигателя, а также сопротивление магнитной цепи.

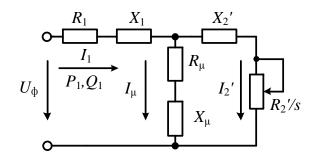


Рисунок 1.18 – Т-образная схема замещения асинхронного двигателя

Схема замещения показывает, что при изменении напряжении изменяются токи в обмотках статора и ротора, а также сопротивление магнитной цепи. При этом потери, вызываемые прохождением этих токов по сопротивлениям схемы замещения, по-разному изменяются в зависимости от напряжения.

на намагничивание  $\mathbf{c}$ ростом напряжения возрастают приблизительно пропорционально квадрату напряжения, подводимого к двигателю. Электрические потери в сопротивлениях  $R_1$  н  $R_2$  зависят от изменения тока при изменении напряжения. Если полезная мощность, отдаваемая двигателем, не изменяется с изменением напряжения, то потери в сопротивлениях  $R_1$ И  $R_2$ изменяются приблизительно обратно пропорционально квадрату напряжения. В том случае, если с изменением напряжения изменяется полезная мощность па валу двигателя, зависимость потерь отличается от квадратичной. Соотношение потерь на намагничивание и электрических потерь в обмотках двигателя различно в зависимости от загрузки двигателя. При сильно загруженном двигателе преобладают потери в обмотках статора и ротора. При слабо загруженном двигателе возрастает удельный вес потерь на намагничивание. В связи с этим изменение напряжения по-разному влияет на потери в двигателе в зависимости от коэффициента его загрузки. При слабо загруженных двигателях при увеличении напряжения увеличиваются суммарные потери в двигателе. Двигатели, работающие с коэффициентом загрузки, близким к единице, с ростом напряжения уменьшают потребляемую мощность [43].

Изменение напряжения, подводимого к двигателям, оказывает также влияние на механические характеристики двигателя.

На рисунке 1.19 представлена зависимость между электромагнитным моментом  $M_{\rm эл}$  и скольжением s при  $f={\rm const},\ U=U_{\rm ном}$ . Здесь же приведена зависимость вращающего момента рабочего механизма  $M_{\rm мех}$  от его скорости вращения. Точка 1 соответствует номинальному режиму работы, при этом скольжение двигателя соответствует номинальному скольжению  $s_{\rm ном}$ .

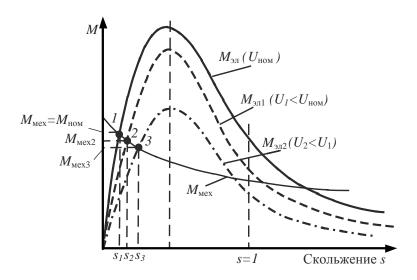


Рисунок 1.19 – Влияние изменений напряжения на электромеханические характеристики АД

При длительном понижении напряжения, подводимого к зажимам электродвигателя механическая характеристика двигателя изменится и может быть представлена зависимостью момента от скольжения  $M_{\text{эл}I} = f(s)$ . Характеристика  $M_{\text{мех}}$  остается прежней. При переходе на характеристику  $M_{\text{эл}I}$  рабочей точкой становится точка 2 с новым значением рабочего момента  $M_{\text{мех}2}$  и рабочего скольжения  $s_2$ . При понижении напряжения скольжение увеличилось и, следовательно, уменьшилась частота вращения ротора

двигателя.

Зависимость частоты вращения ротора двигателя от напряжения можно отразить следующей формулой [34]:

$$n = n_{\rm c} \left( 1 - k_{\rm 3} \frac{U_{\rm hom}^2}{U^2} \cdot s_{\rm hom} \right), \tag{1.3}$$

где  $n_{\rm c}$  — синхронная частота вращения;  $k_{\rm 3}$  — коэффициент загрузки двигателя;  $U_{\rm ном}$ ,  $s_{\rm ном}$  - номинальные значения напряжения и скольжения соответственно.

Мощность, развиваемая двигателем на валу, пропорциональна частоте вращения двигателя и развиваемому моменту:

$$P \equiv M \cdot n, \tag{1.4}$$

Следовательно, изменение развиваемой двигателем мощности при изменении напряжения зависит от того, как при этом изменяются частота вращения двигателя и момент сопротивления.

Таким образом, регулирующий эффект активной нагрузки АД по напряжению складывается из зависимостей потерь в двигателе от изменения напряжения и полезной мощности на валу двигателя от напряжения. Его величина изменяется от слабо отрицательных значений до значения, близкого к единице [43].

Реактивная мощность  $Q_{\rm дв}$ , потребляемая из сети трехфазным АД, состоит из реактивной мощности намагничивания стали  $Q_0$  и реактивной мощности рассеяния  $Q_{\rm p}$ . При номинальном напряжении на зажимах двигателя и m=1 реактивная мощность равна  $Q_{\rm H}=Q_{\rm 0H}+Q_{\rm p.H.}$ . На характер изменения величины  $Q_{\rm дв}$  в зависимости от изменения U на зажимах двигателя в значительной мере влияет коэффициент  $k_Q$ = $Q_{\rm 0H}/Q_{\rm H}$ , равный отношению реактивной мощности, затрачиваемой на намагничивание стали при номинальном напряжении, к суммарной реактивной мощности, потребляемой двигателем из сети при номинальной нагрузке АД.

Повышение напряжения на зажимах АД приводит к увеличению потребляемой им реактивной мощности. Проведенные исследования в

отношении АД серии 4А показывают, что потребление реактивной мощности при повышении напряжения на 1% возрастает на 2÷4% при любых коэффициентах загрузки [43].

При этом форма статических характеристик нагрузки и значения регулирующих эффектов зависят от номинальной мощности двигателя, их коэффициентов загрузки и моментно-скоростных характеристик производственных механизмов.

АД являются наиболее распространенными электроприемниками на угольных шахтах [45-46]. Ориентировочные данные о соотношениях нагрузок электроприемников на предприятиях угольной промышленности следующие [45]: синхронные двигатели – 21%, асинхронные двигатели – 68% (6-10 кВ – 21%, до 6 кВ – 47%), освещение – 5%, прочая нагрузка – 6 %. Они комплексах, насосных используются на очистных станциях, вентиляторах местного проветривания, водоотливах и пр. Их мощность постоянно увеличивается в связи с ростом энерговооруженности очистных комплексов.

Данные о количестве двигателей разных типов на одной из угольных шахт Кузбасса (рисунок 1.20) показывают, что АД с короткозамкнутым ротором преобладают в количественном отношении над электродвигателями других типов.

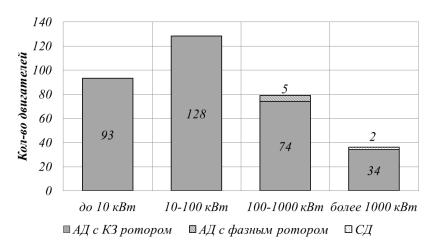


Рисунок 1.20 – Данные о количестве двигателей разных типов и мощностей на одной из угольных шахт Кузбасса

Таким образом, АД с короткозамкнутым ротором являются наиболее распространенными электроприемниками на угольных шахтах и в целом определяют уровень потерь и потребления электрической энергии.

Отметим, что шахтовые АД имеют более тяжелые условия работы и пуска по сравнению с АД общепромышленного значения. Это вызвано их большей удаленностью от центров питания и резко переменным режимом работы. В связи с этим, отличаются их максимальные и пусковые моменты ( $M_{max}$  и  $M_{nyck}$ ). Например, двигатель общепромышленного назначения марки АИР250M6 ( $P_{hom}$ =55 кВт,  $U_{hom}$ =380/660B) имеет  $M_{max}$ =2,2  $_u$   $M_{nyck}$ =1,8, тогда как двигатель взрывозащищенного исполнения марки 2ВРМ225М2 ( $P_{hom}$ =55 кВт,  $U_{hom}$ =660B) имеет  $M_{max}$ =3,0  $_u$   $M_{nyck}$ =2,0.

В связи с этим, ранее полученные статические характеристики нагрузки АД общепромышленного назначения по напряжению не могут быть использованы для описания шахтовых АД.

Потери активной и реактивной мощности в пассивных элементах. Из выражения (1.5) для потерь активной мощности известно, что одновременное увеличение всех напряжений на n%, приводит к снижению этих потерь в данной части сети на [47]:

$$\frac{\Delta P}{(1+0,01n)^2} \approx \Delta P(1-0,02n), \ \kappa Bm$$
 (1.5)

т.е. приблизительно на 2n%.

Фактически величина потерь активной и реактивной мощности на пассивных элементах сети определяется их сопротивлением, а также величиной их токовой нагрузки [48]. В случае учета статических характеристик, величина активной и реактивной мощности, потребляемой электроприемниками, будет зависеть от уровня напряжения на их зажимах. При этом данный уровень напряжения будет определяться потерями напряжения в пассивных элементах. Следовательно, характер изменения токовой нагрузки, потерь активной и реактивной мощности будет

неоднозначным.

Активные и индуктивные сопротивления пассивных элементов СЭС могут быть постоянными величинами (кабельные линии, токоограничивающий реактор), переменными (силовые трансформаторы ГПП), условно переменными (ПУПП).

Переменный характер сопротивлений трансформаторов ГПП вызван наличием устройства регулирования под нагрузкой (РПН) переключение, которого приводит к изменению числа витков обмотки ВН и, как следствие, изменению индуктивного и активного сопротивлений. Условно переменный характер сопротивлений ПУПП вызван тем, что в процессе перемещения ПУПП в выработке выполняются переключения устройства ПБВ, которые приводят к изменению сопротивления трансформатора.

Анализ научно-технической литературы [23, 42, 45] показывает, что разработке мероприятий ПО повышению энергоэффективности при изменения сопротивлений на пассивных элементах СЭС практически не учитываются. В условиях учета статических характеристик нагрузки по напряжению ЭТО тэжом привести К серьезным погрешностям моделировании режима работы СЭС угольной шахты. В частности, это отмечается в работе [49], где показано, что изменение уровня потребления активной и реактивной мощности может быть соизмеримо с изменением уровня потерь.

Обобщенные статические характеристики нагрузки угольной шахты по напряжению. В нагрузочном узле обычно имеется сочетание различных электроприемников, отличающихся своими статическими характеристиками. Обобщенная статическая характеристика нагрузки узла по напряжению зависит от статических характеристик отдельных электроприемников и долевого участия нагрузки каждой группы электроприемников.

В некоторых научных работах приводятся обобщенные статические характеристики нагрузки, полученные путем суммирования статических характеристик нагрузки отдельных электроприемников. В работе [50] в

отношении СЭС промышленного предприятия были получены статические характеристики нагрузки цеховых подстанций ПО напряжению различных коэффициентах загрузки оборудования. Проведенный анализ характеристик нагрузки полученных статических ПО напряжению показывает, что оптимальный уровень напряжения на шинах питающей подстанции может соответствовать любому значению в диапазоне 0,85- $1,1U_{\text{ном}}$ . Определяющими факторами при этом является состав нагрузки, загрузка электроприемников и протяженность СЭС.

В работе [5] приводятся статические характеристики нагрузки по напряжению, полученные для узлов нагрузки включающих различные группы электроприемников: АД, СД, освещение. При этом показано, что рациональный уровень напряжения может быть любым в пределах от 0,9 до  $1,1U_{\text{ном}}$ .

Однако для угольных шахт подобные обобщенные статические характеристики нагрузки по напряжению еще не были получены. Следовательно, отсутствует понимание того, какой уровень напряжения должен поддерживаться в СЭС для обеспечения минимизации уровня потерь электроэнергии.

#### 1.7. Выводы

- 1. Анализ научных работ в области разработки систем регулирования напряжения показывает, что в настоящее время отсутствуют системы регулирования напряжения, обеспечивающие оптимальную работу устройств регулирования напряжения в СЭС угольных шахт. Следовательно, разработка системы оптимального регулирования напряжения в СЭС угольных шахт является актуальной научно-технической задачей.
- 2. Оптимальное регулирование напряжения в СЭС угольной шахты требует выполнения задач обеспечения нормативного уровня напряжения и минимизации потерь электроэнергии в шахтовой сети.

- 3. Анализ изменений уровня напряжения в СЭС угольной шахты показал, что диапазон одиночных отклонений напряжения может достигать 16,9 ÷ (+6,2)%. Это свидетельствует, что задача поддержания нормативного уровня напряжения на зажимах электроприемников угольной шахты не всегда выполняется.
- 4. Анализ использования технических средств регулироваия напряжения на угольных шахтах Кузбасса показал, что потенциал средств регулирования напряжения не реализуется в полной мере для выполнения задач регулирования напряжения. Для реализации их потенциала требуется разработка системы оптимального регулирования напряжения, выполняющей задачи обеспечения нормативного уровня напряжения и минимизации потерь электроэнергии.
- 5. При разработке алгоритма оптимального регулирования, необходимо учитывать наличие синхронных машин, которые в настоящее время практически не задействованы в регулировании напряжении в СЭС угольных шахт.
- 6. Установлено, что перспективные средства регулирования напряжения (ДКРМ, ВДТ, ПУПП с тиристорными УРПН, УПК, ТРН) не реализованы во взрывозащищенном исполнении. В настоящее время для автоматического регулирования напряжения в СЭС угольных шахт могут быть использованы исключительно УРПН, БСК и синхронные машины.
- 7. Опираясь на ранее проведенные исследования, для реализации оптимального регулирования напряжения требуется получение статических характеристик нагрузки по напряжению и регулирующих эффектов нагрузки, которые ранее не были получены в отношении электроприемников СЭС угольной шахты. При этом в первую очередь целесообразно исследовать статические характеристики нагрузки по напряжению для шахтовых АД, которые составляют около 70% установленной мощности электродвигателей, используемых на угольных шахтах.

### 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОТРЕБЛЕНИЯ АКТИВНОЙ И РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ УГОЛЬНЫХ ШАХТ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ НАПРЯЖЕНИЯ

# 2.1. Исследование статических характеристик и регулирующих эффектов нагрузки шахтовых асинхронных двигателей по напряжению

Одной ИЗ задач регулирования системы напряжения является обеспечение отклонений напряжения в пределах нормативных значений. При ГОСТ согласно 32144-2013 отклонения напряжения ЭТОМ количественной характеристикой медленных изменений напряжения 1 электропитания (продолжительностью более минуты). Отклонения напряжения определяются по усредненным значениям напряжения интервале времени 10 минут в соответствии с требованиями ГОСТ 30804.4.30.

Как отмечается в [51], процессы при медленных отклонениях от установившегося состояния всегда могут рассматриваться на основе статических характеристик. Их применение также допустимо при рассмотрении динамических процессов [51].

Таким образом, в рамках разрабатываемой системы регулирования, учитывая, что регулирование напряжения допустимо рассматривать статические режимы работы электроприемников угольных шахт и характеризующие их статические характеристики нагрузки по напряжению.

При этом статические характеристики нагрузки электроприемников и потерь мощности в пассивных элементах сети допустимо рассматривать раздельно с последующим анализом имитационной модели СЭС угольной шахты.

### 2.1.1. Общие сведения

Статические характеристики активной и реактивной нагрузки АД по напряжению могут быть получены расчетным или экспериментальным (метод пассивного или активного эксперимента) способом.

Методы пассивного и активного эксперимента позволяют по данным измерений сформировать регрессионные зависимости и определить параметры статических характеристик нагрузки по напряжению. Однако проведение пассивного эксперимента не позволяет получить достаточное количество данных для получения точных статических характеристик нагрузки, а проведение активного эксперимента чревато повреждением оборудования и нарушением технологического процесса. В связи с этим, в дальнейшем для определения статических характеристик АД по напряжению рассматривается только расчетный способ.

При решении задачи минимизации уровня потребления активной мощности целесообразно рассматривать статические характеристики АД по напряжению в диапазоне  $0,9-1,1U_{\text{ном}}$  т.к. он соответствует предельно допустимым отклонениям напряжения, установленным ГОСТ 32144-2013. Поскольку характер статических характеристик нагрузки по напряжению в этом диапазоне практически линеен [43] для их аппроксимации достаточно использовать полином 1-й степени:

$$P(U) = P_{\text{H}} P_{*}(U) = P_{\text{H}} \left[ a_0 + a_1 \cdot \left( \frac{U}{U_{\text{HoM}}} \right) \right];$$
 (2.1)

$$Q(U) = Q_{\mathrm{H}}Q_{*}(U) = Q_{\mathrm{H}} \left[ b_{0} + b_{1} \cdot \left( \frac{U}{U_{\mathrm{HOM}}} \right) \right]$$

$$(2.2)$$

где  $P_{\rm H}$  и  $Q_{\rm H}$  — активная и реактивная мощности АД при номинальном напряжении;  $P_*(U)$  и  $Q_*(U)$  — статические характеристики активной и реактивной нагрузкии АД по напряжению в относительных единицах;  $U_{\rm HOM}$  — номинальное напряжение АД;  $a_0,\ a_1,\ b_0,\ b_1$  — коэффициенты полинома 1-й степени.

Регулирующие эффекты активной ( $\alpha_1$ ) и реактивной ( $\beta_1$ ) нагрузки АД по напряжению определяются по формулам:

$$\alpha_{1} = \frac{dP}{dU}, \qquad (2.3) \qquad \beta_{1} = \frac{dQ}{dU}, \qquad (2.4)$$

где dP, dQ - изменение активной и реактивной нагрузки, dU - изменение уровня напряжения в сети.

# 2.1.2. Алгоритм определения статических характеристик нагрузки асинхронных двигателей по напряжению

При моделировании АД в инженерных расчетах для упрощения математических операций используют  $\Gamma$ -образную схему замещения (рисунок 2.1).

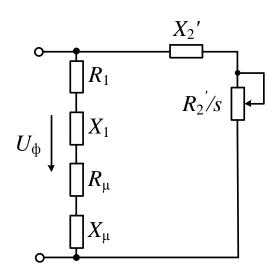


Рисунок 2.1 – Г-образная схема замещения АД

При переходе от Т-образной схемы замещения к Г-образной выполняется перенос ветви намагничивания к месту приложения питающего напряжения с использованием коэффициента преобразования. При этом при изменении нагрузки не происходит изменения намагничивающего тока, следовательно, в номинальном режиме ток намагничивания оказывается завышенным. Однако наиболее полно характеристики АД можно передать

только с использованием Т-образной схемы замещения асинхронной машины (рисунок 1.17). В [52] отмечается, что переход к Г-образной схеме замещения приводит к погрешности 3-5% при определении силы тока ротора. При этом сравнительный анализ результатов расчета параметров ΑД характеристик при использовании двух схем замещения (Т-образной, Гобразной) показывает, что при переходе от Т-образной схемы замещения АД к Г-образной в расчетах токов ветвей АД возникает погрешность до 5,8% и до 7,6% при расчете перетоков реактивных мощностей [52]. В работе [49] в качестве причины применения Г-образной схемы замещения приводится отсутствие данных о сопротивлении ротора и намагничивающей ветви. Тем не менее, формулы расчета параметров Т-образной схемы замещения, представленные в [53-55] позволяют определить сопротивление ротора и статора по каталожным данным. Таким образом, при исследовании статических характеристик нагрузки по напряжению электроприемников целесообразно рассматривать Т-образную схему замещения.

Вышеуказанный анализ позволил составить алгоритм определения статических характеристик АД по напряжению с применением MATLAB Simulink (рисунок 2.2). Предложенный алгоритм включает в себя следующие этапы:

1. Ввод исходных данных. Исходными данными для расчета параметров машины являются следующие:  $f_1$  — частота сети (Гц);  $P_{\rm H}$  — номинальная мощность [Вт];  $U_{\rm H}$  — номинальное линейное напряжение (В);  $n_{\rm H}$  — номинальная угловая частота вращения вала (об/мин); p — число пар полюсов;  $\eta_{\rm HOM}$ — коэффициент полезного действия (о.е.);  $\cos\varphi_{\rm HOM}$ — коэффициент мощности (о.е.);  $I_{\rm H}$  — номинальный ток статора (А);  $k_I$  — кратность пускового тока (о.е.);  $m_{max}$  — кратность максимального момента (о.е.);  $m_{\rm II}$  — кратность пускового момента (о.е.); J — момент инерции (кг х м²).

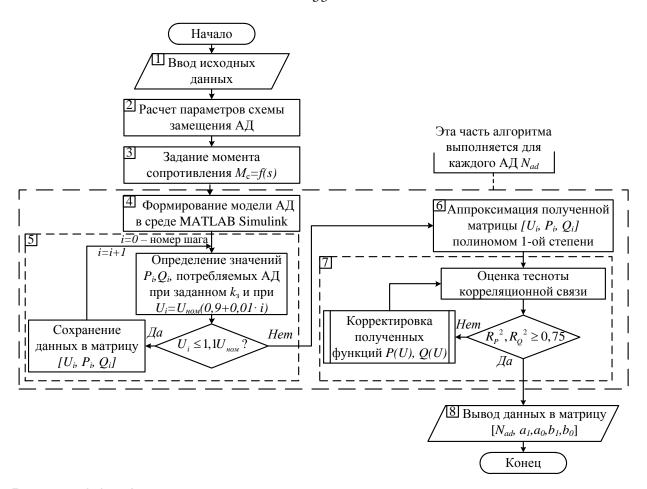


Рисунок 2.2 – Алгоритм определения параметров статических характеристик нагрузки АД по напряжению с использованием MATLAB Simulink

Исходные данные момента сопротивления механизма (нагрузки):  $M_{\rm TP}$  – начальный момент трения (s=1) (H: $_{\it M}$ ),  $k_{\rm 3}$  – коэффициент загрузки двигателя (о.е.);  $\alpha$  – показатель степени, характеризующий механизм (о.е).

При наличии исходных данных в рамках программы возможен учет насыщения стали АД. Параметры кривой намагничивания АД вводятся в блоке параметров АД «[i;v] (pu)» в среде MATLAB Simulink. Кривые намагничивания  $U=f(I_{\mu})$  задаются исходя из вольтамперной характеристики двигателя или справочных данных.

2. Расчет параметров схемы замещения  $A\mathcal{I}$ . Выполняется с использованием формул, представленных в [54]. Процесс определения точного значения расчетного коэффициента C реализуется путем решения следующего уравнения:

$$\frac{\sqrt{\left[\left(U_{_{\rm H}}/\sqrt{3}\right)/\left(k_{_{I}}\cdot I_{_{\rm H}}\right)\right]^{2}-\left(\frac{1}{2}\frac{U_{_{\rm H}}^{2}\cdot (1-s_{_{\rm H}})}{C(1+C/s_{_{k}})m_{_{\rm max}}\left(P_{_{H}}+\Delta P_{_{\rm MEX}}\right)}+R_{_{r}}\right)^{2}}}{4pf_{_{1}}} - C, \qquad (2.5)$$

$$\frac{4pf_{_{1}}}{\left(U_{_{\rm H}}/\sqrt{3}\right)/\left(k_{_{I}}\cdot I_{_{\rm H}}\right)\right]^{2}-\left(\frac{1}{2}\frac{U_{_{\rm H}}^{2}\cdot (1-s_{_{\rm H}})}{C(1+C/s_{_{k}})m_{_{\rm max}}\left(P_{_{H}}+\Delta P_{_{\rm MEX}}\right)}+R_{_{r}}\right)^{2}}}{4pf_{_{1}}}$$

где  $s_k$  - критическое скольжение (o.e.);  $\Delta P_{\text{мех}}$  - механические потери (Вт)  $R_r$  - сопротивление ротора (Ом);  $L_s$  - индуктивность статора (Гн).

Решение уравнения производится с использованием встроенной в MATLAB команды *fzero* для поиска нулей функции одной переменной.

В завершении расчета в рабочую среду программы в виде матрицы выводятся параметры схемы замещения для каждого исследуемого двигателя.

3. Задание механической характеристики момента нагрузки

Механическая характеристика момента сопротивления нагрузки задается в виде формулы:

$$M_{\rm c} = k_{\rm 3} M_{\rm {\scriptscriptstyle HOM}} \left( M_{\rm {\scriptscriptstyle TP}} + (1 - M_{\rm {\scriptscriptstyle TP}}) \cdot \left( \frac{1 - s}{1 - s_{\rm {\scriptscriptstyle HOM}}} \right)^{\alpha} \right),$$
 (2.6)

Показатель степени  $\alpha$ , учитывающий изменение  $M_{\rm c}$  при изменении скорости вращения двигателя определяется типом механизма.

4. Создание модели АД в среде MATLAB Simulink. Модель АД создается с использованием инструментария MATLAB Simulink. В параметры модели вводятся параметры, определенные в п. 2,3. Внешний вид модели представлен на рисунке 2.3.

Модель может корректироваться в зависимости от типа двигателя.

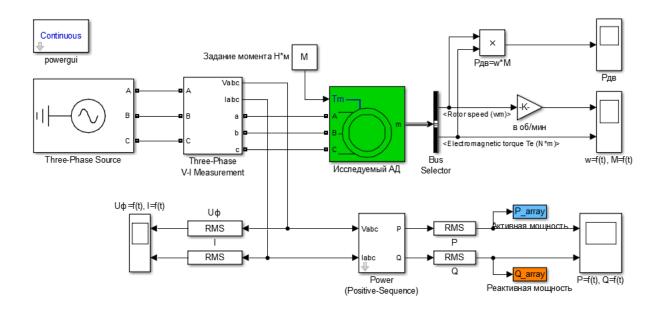


Рисунок 2.3 – Модель для определения параметров статических характеристик АД по напряжению

5. Определение значений активной и реактивной мощностей, потребляемых  $A\mathcal{I}$  при различном уровне напряжения. Для каждого исследуемого двигателя выполняется расчет электрического режима вплоть до наступления установившегося режима. Расчет выполняется для диапазона напряжений  $0.9-1.1U_{\text{ном}}$  (расчет выполняется 21 раз с дискретностью  $0.01U_{\text{ном}}$ ).

Полученные данные об изменении потребления активной и реактивной мощности (блоки  $P_array$ ,  $Q_array$ ) сохраняются в рабочей среде MATLAB. Также выполняется формирование матриц  $[U_i, P_i, Q_i]$  для каждого моделируемого АД.

6. Аппроксимация полученных матриц  $[U_i, P_i, Q_i]$  полиномом первой степени. Аппроксимация полученных зависимостей выполняется с использованием встроенной в MATLAB функции polyfit. В результате для каждого АД формируется полином 1-й степени.

7. Оценка тесноты корреляционной связи. Для оценки достоверности полученных полиномов выполняется определение коэффициента детерминации:

$$R_{P}^{2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{20} (P_{i} - P_{\text{ехн}i})}{\sum_{i=1}^{20} (P_{i} - \overline{P})}, \qquad (2.7) \qquad R_{Q}^{2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{20} (Q_{i} - Q_{\text{ехн}i})}{\sum_{i=1}^{20} (Q_{i} - \overline{Q})}, \qquad (2.8)$$

где  $P_i, Q_i$ —значения активной и реактивной мощностей, полученные в результате моделирования;  $P_{\rm cxhi}, Q_{\rm cxhi}$  - значения активной и реактивной мощностей, полученные из определенных полиномов 1-й степени,  $\overline{P}, \overline{Q}$  - средние значения.

Если  $R_P^{\ 2}, R_Q^{\ 2} \ge 0,75$ , полученные функции обладают сильной корреляционной связью с данными, полученными в среде MATLAB Simulink [18]. В противном случае выполняется корректировка полученных функций.

8. Получение окончательных значений коэффициента полинома 1-й степени. Данные выводятся в виде матрицы формы  $[N_{ad}, a_1, a_0, b_1, b_0]$   $(N_{ad-}$  номер АД) и могут быть в дальнейшем использованы для формирования базы данных для задания двигательной нагрузки при расчете электрических режимов СЭС угольной шахты или для выполнения последующего определения эквивалентных статических характеристик нагрузки по напряжению.

### 2.1.3. Задание кривых намагничивания асинхронных двигателей

В связи с отсутствием данных о конструктивных параметрах большинства АД целесообразно принять к рассмотрению универсальную кривую намагничивания, представленную в справочнике (рисунок 2.4) [56].

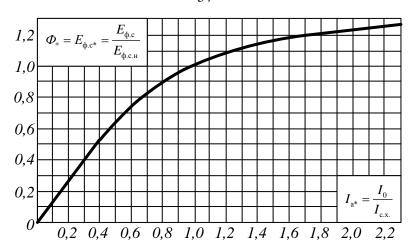


Рисунок 2.4 – Универсальная кривая намагничивания для АД с короткозамкнутым ротором

Пользуясь тем, что ЭДС АД при номинальной частоте мало отличается от напряжения на зажимах двигателя даже при больших токах статора, магнитный поток принято считать пропорциональным напряжению. Таким образом, поле «[i;v] (pu)» в среде MATLAB Simulink может быть заполнено исходя из кривой намагничивания на рисунке 2.4. Поскольку для двигателей разных мощностей будет использоваться одна кривая, координаты точек кривой должны быть представлены в относительных единицах. Для задания оси абсцисс необходимо определить ток холостого хода двигателя при номинальном напряжении  $I_0$ . Для этого используется следующая формула [57]:

$$I_0 = I_{\text{H}} \left( \sin \varphi_{\text{HOM}} - \frac{\eta_{\text{HOM}} \cdot \cos \varphi_{\text{HOM}}}{2 \cdot m_{\text{max}}} \right)$$
 (2.9)

При необходимости вольт-амперные характеристики могут быть получены экспериментальным или расчетным путем исходя из кривых намагничивания стали (зависимости B=f(H)) и конструктивных параметров АД [58].

## 2.1.4. Анализ статических характеристик и регулирующих эффектов нагрузки шахтовых асинхронных двигателей по напряжению

На базе предложенного алгоритма была разработана программа в среде MATLAB (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018616064), позволяющая выполнять расчет параметров статических характеристик нагрузки АД по напряжению.

С использованием программы выполнено определение статических характеристик по напряжению при различных коэффициентах загрузки  $(k_3)$  для двигателей серии BAO2 ( $U_{\text{ном}}$ =1140 B), используемых на насосных станциях. Пример полученных статических характеристик нагрузки по напряжению для АД BAO2-280S4 представлен на рисунке 2.5.

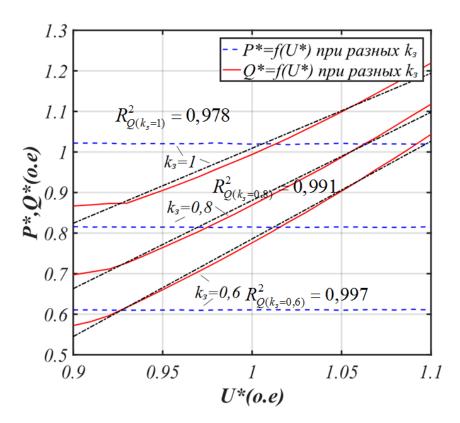


Рисунок 2.5 – Статические характеристики нагрузки по напряжению для АД BAO2-280S4 при различных коэффициентах загрузки

Полученные статические характеристики нагрузки по напряжению для двигателей серии ВАО2 были аппроксимированы. В результате получены коэффициенты полинома 1-й степени, которые приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 — Полученные значения коэффициентов полинома 1-й степени для двигателей насосной станции серии ВАО2 ( $U_{\text{ном}}$ =1140 В)

		$k_{_3}$	Коэффициенты полинома 1-й степени					
Марка АД	Р <sub>н</sub> , кВт		по активной	мощности	по реактивной мощности			
			$a_1$	$a_0$	$b_1$	$b_0$		
	132	1,0	-0,023	1,023	1,390	-0,366		
DAO2		0,8	-0,009	0,809	1,784	-0,859		
BAO2- 280S4		0,6	0,003	0,597	2,042	-1,212		
20034		0,4	0,005	0,395	2,221	-1,456		
		0,2	0,007	0,193	2,330	-1,601		
	160	1,0	-0,022	1,023	1,376	-0,353		
DAO2		0,8	-0,011	0,811	1,767	-0,846		
BAO2- 280M4		0,6	0,000	0,600	2,022	-1,198		
2001014		0,4	0,006	0,394	2,199	-1,440		
		0,2	0,009	0,191	2,310	-1,586		
	250	1,0	-0,018	1,018	1,277	-0,254		
DAO2		0,8	-0,011	0,811	1,650	-0,766		
BAO2- 315M4		0,6	-0,004	0,603	1,950	-1,135		
3131/14		0,4	0,003	0,397	2,132	-1,388		
		0,2	0,008	0,192	2,243	-1,538		
	315	1,0	-0,015	1,015	1,167	-0,144		
BAO2- 315L4		0,8	-0,011	0,811	1,614	-0,687		
		0,6	-0,001	0,601	1,877	-1,074		
31314		0,4	0,004	0,396	2,065	-1,336		
		0,2	0,005	0,195	2,180	-1,493		

Используя данные таблицы 2.1 и формулы (2.3 – 2.4) были построены графики изменения регулирующего эффекта активной и реактивной нагрузки АД по напряжению в зависимости от их загрузки, которые представлены на рисунке 2.6.

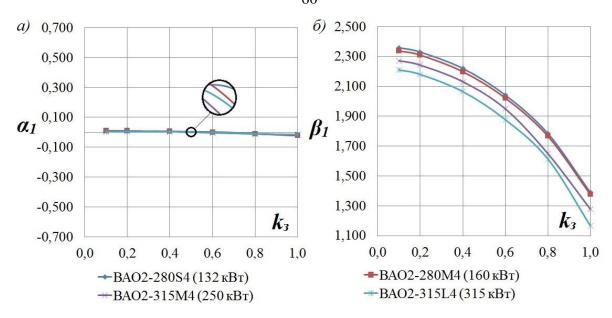


Рисунок 2.6 – Регулирующие эффекты активной (а) и реактивной (б) нагрузки АД по напряжению для насосов серии ВАО2 (132-315 кВт) с  $U_{\text{ном}}{=}1140~\text{кB}$ 

Данные таблицы 2.1 и рисунка 2.6 показывают, что изменение напряжения на зажимах двигателей серии ВАО2 практически не приводит к изменению потребления активной мощности вне зависимости от коэффициента загрузки двигателя и его номинальной мощности ( $\alpha_1$ = -0,023÷0,009%). Тогда как при повышении напряжения на 1% уровень потребления реактивной мощности возрастает на 1,17-2,33% в зависимости от коэффициента загрузки двигателя и его номинальной мощности.

С помощью программы также были определены регулирующие эффекты активной и реактивной нагрузки АД для водоотливных насосов, вентиляторов главного и местного проветривания, ленточных конвейеров и очистных комплексов [59]. Полученные данные представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Регулирующие эффекты активной и реактивной нагрузки по напряжению для шахтовых электродвигателей

Серия двигателей	<i>U</i> <sub>ном</sub> , кВ	Р <sub>ном</sub> , кВт	p	$\alpha_{_1}$ $\beta_{_1}$		Назначение	
BAO2	0,66÷ 1,14	132÷ 315	1	-0,023÷ -1,17 0,009 ÷2,33		Насосные станции, ленточные конвейеры	
	6	200÷ 1000	1	-0,009÷ 0,008	0,95 ÷2,32	Вентиляторы главного	
BAO7			2	-0,013÷ 0,004	1,02 ÷2,21		
BAU /			3	-0,008÷ 0,007	1,20 ÷2,40	проветривания, водоотливные насосы	
			4	-0,004÷ 0,018	1,40 ÷2,55		
BPM	0,66÷ 1,14	2,2÷ 110	1	-0,083÷ 0,028	1,46 ÷2,60	Вентиляторы местного проветривания	
АД очистных комплексов	1,14÷3 ,3	160÷ 850	1	-0,017÷ 0,014	0,95÷ 2,55	Привода резания очистных комплексов	

Проведенный анализ полученных статических характеристик и регулирующих эффектов нагрузки шахтовых АД по напряжению показал следующее:

- 1. Изменение напряжения на 1% от номинального практически не приводит к изменению потребления активной мощности шахтовыми электродвигателями, следовательно, она может приниматься постоянной.
- 2. Регулирующий эффект реактивной нагрузки шахтовых АД по напряжению находится в пределах 0,95 2,60%. При этом его значение обратно пропорционально коэффициенту загрузки, номинальной мощности и количеству пар полюсов двигателя.
- 3. Полученные результаты могут быть использованы при моделировании СЭС угольной шахты с целью определения оптимального уровня напряжения в узлах сети.

### 2.2. Исследование эквивалентных статических характеристик нагрузки по напряжению для участков системы электроснабжения

# 2.2.1. Алгоритм определения эквивалентных статических характеристик нагрузки по напряжению в системе электроснабжения

При определении эквивалентных статических характеристик нагрузки по напряжению целесообразно рассматривать СЭС угольной шахты иерархически с ее разделением на ряд подсистем и их последующим представлением в виде эквивалентных статических характеристик. Это последующего определения оптимальных ДЛЯ напряжения в узлах СЭС и формирования соответствующего алгоритма регулирования напряжения. При эквивалентировании особый интерес представляют собой подсистемы СЭС с электроприемниками, на зажимах которых отсутствует возможность контроля фактического уровня напряжения и потребления.

В качестве такой подсистемы в СЭС угольной шахты целесообразно рассматривать участок СЭС, включающий в себя ПУПП, низковольтную распределительную сеть и приемники этой сети (рисунок 2.7).

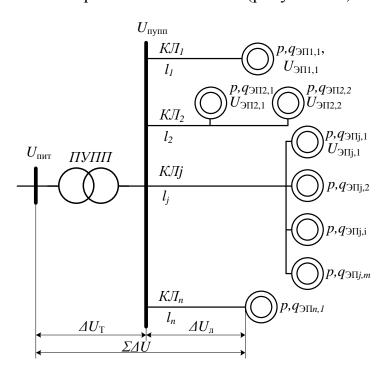


Рисунок 2.7 – Схема электроснабжения от ПУПП

Для формирования эквивалентных статических характеристик нагрузки необходимо сформировать схему замещения сети подсистемы (рисунок 2.8).

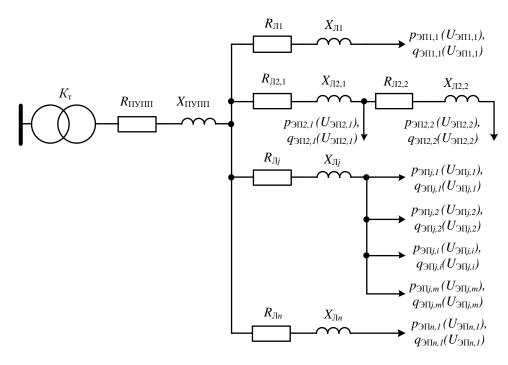


Рисунок 2.8 – Схема замещения

В соответствии с полученной схемой замещения мощность, поступающая от источника питания, будет определяться мощностью электроприемников и потерями мощности в линиях и ПУПП. Таким образом, активная и реактивная мощность, потребляемая ПУПП от сети, может быть выражена по формулам:

$$P_{\Pi Y \Pi \Pi} = \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{m} p_{9\Pi j,i}(U_{9\Pi j,i^*}) + \sum_{j=1}^{n} \Delta P_{\Pi j}(U_{1111}) + \Delta P_{\Pi Y \Pi \Pi}(U_{1111},k_3), \qquad (2.10)$$

$$Q_{\Pi Y \Pi \Pi} = \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{m} q_{\text{эп}j,i}(U_{\text{эп}j,i^*}) + \sum_{j=1}^{n} \Delta Q_{\eta j}(U_{\text{пупп}^*}) + \Delta Q_{\Pi Y \Pi \Pi}(U_{\text{пит}^*}, k_3),$$
(2.11)

где  $p_{\text{эп}j,i}$ ,  $q_{\text{эп}j,i}$  - активная и реактивная мощность, потребляемая i-м электроприемником, подключенном к j-ой линии,  $\Delta P_{\text{п}j}$ ,  $\Delta Q_{\text{п}j}$  - потери активной и реактивной мощности в j-ой линии,  $\Delta P_{\text{ПУПП}}$ ,  $\Delta Q_{\text{ПУПП}}$  - потери активной и реактивной мощности в ПУПП,  $k_3$  — коэффициент загрузки трансформатора ПУПП, n — количество низковольтных линий, отходящих от ПУПП, m — количество электроприемников, подключенных к одной линии.

Напряжения в узлах в относительных единицах к номинальному  $U_{\rm H}$ :  $U_{\rm пит}^*$  — на шинах ПУПП,  $U_{{}_{\rm эпj,}i^*}$ - напряжение на зажимах i-ого электроприемника, подключенного к j-ой линии.

При использовании полиномов 1-й степени (2.6-2.7) формулы (2.10-2.11) будут иметь следующий вид:

$$P_{\text{пупп}} = \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{m} p_{\text{mex.snj},i} \left( a_0 + a_1 \cdot U_{\text{snj},i^*} \right) + \sum_{j=1}^{n} \left( \sum_{i=1}^{m} \left( p_{\text{tex.sni}} \left( a_0 + a_1 \cdot U_{\text{snj},i^*} \right) \right)^2 + \sum_{i=1}^{m} \left( q_{\text{tex.sni}} \left( b_0 + b_1 \cdot U_{\text{snj},i^*} \right) \right)^2 \right) \cdot R_{\text{nj}} + \left( \sum_{j=1}^{n} \left( P_{\text{tex.snj}} \left( A_0 + A_1 \cdot U_{\text{ПУПП}^*} \right) \right)^2 + \sum_{j=1}^{n} \left( Q_{\text{tex.snj}} \left( B_0 + B_1 \cdot U_{\text{ПУПП}^*} \right) \right)^2 \right) \cdot R_{\text{пупп}} + \Delta P_{\text{xx}} \cdot \left( U_{\text{пит}^*} \right)^2;$$

$$(2.12)$$

$$Q_{\text{nymn}} = \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{m} q_{\text{rex.sn}j,i} \left( a_0 + a_1 \cdot U_{\text{sn}j,i*} \right) + \sum_{j=1}^{n} \frac{\left( \sum_{i=1}^{m} \left( p_{\text{rex.sn}i} \left( a_0 + a_1 \cdot U_{\text{sn}j,i*} \right) \right)^2 + \sum_{i=1}^{m} \left( q_{\text{rex.sn}i} \left( b_0 + b_1 \cdot U_{\text{sn}j,i*} \right) \right)^2 \right) \cdot X_{nj}}{U_{\text{nom}}^2 \cdot U_{\text{IIVIII}*}^2} + \frac{\left( \sum_{j=1}^{n} \left( P_{\text{rex.sn}j} \left( A_0 + A_1 \cdot U_{\text{IIVIIII}*} \right) \right)^2 + \sum_{j=1}^{n} \left( Q_{\text{rex.sn}j} \left( B_0 + B_1 \cdot U_{\text{IIVIIII}*} \right) \right)^2 \right) \cdot X_{\text{nymn}}}{U_{\text{nom}}^2 \cdot U_{\text{nom}}^2} + \Delta Q_{\text{xx}} \cdot \left( U_{\text{nom}*} \right)^2;$$

где  $p_{\text{тех.эпј,i}}$   $q_{\text{тех.эпј,i}}$  —активная и реактивная мощность потребляемая электроприемником, определяемая технологическим процессом и соответствующая номинальному уровню напряжения;  $a_{j,i}$ ,  $a_{lj,i}$ ,  $b_{0j,i}$ ,  $b_{lj,i}$  - коэффициенты статических характеристик электроприемника;  $P_{\text{тех.эпj}}$ ,  $Q_{\text{тех.эпj}}$  — суммарная мощность электроприемников, подключенных к КЛ при  $U_{\text{H}}$ ;  $A_{0j}$ ,  $A_{lj}$ ,  $B_{0j}$ ,  $B_{lj}$  — коэффициенты эквивалентных статических характеристик нагрузки, подключенной к ПУПП;  $R_{nj}$ ,  $X_{nj}$  — активное и индуктивное сопротивление j-ой линии,  $R_{\text{пупп}}$ ,  $X_{\text{пупп}}$  - активное и индуктивное сопротивление ПУПП,  $\Delta P_{\text{хх}}$ ,  $\Delta Q_{\text{хx}}$  — активные и реактивные потери холостого хода в ПУПП.

Для определения эквивалентных статических характеристик нагрузки подсистемы с использованием формул (2.12-2.13) необходимо определить уровень напряжения в узлах сети. Расчет может быть выполнен с использованием различных методов: по данным начала линии, по данным конца линии, методом Зейделя, методом Ньютона и др.

Для выполнения расчетов предлагается использовать готовое программное обеспечение – программно-вычислительный комплекс (ПВК) RastrWin3[60], в котором присутствует возможность учета статических Алгоритм характеристик нагрузки. ДЛЯ определения эквивалентных статических характеристик нагрузки с использованием ПВК RastrWin3 представлен на рисунке 2.9.

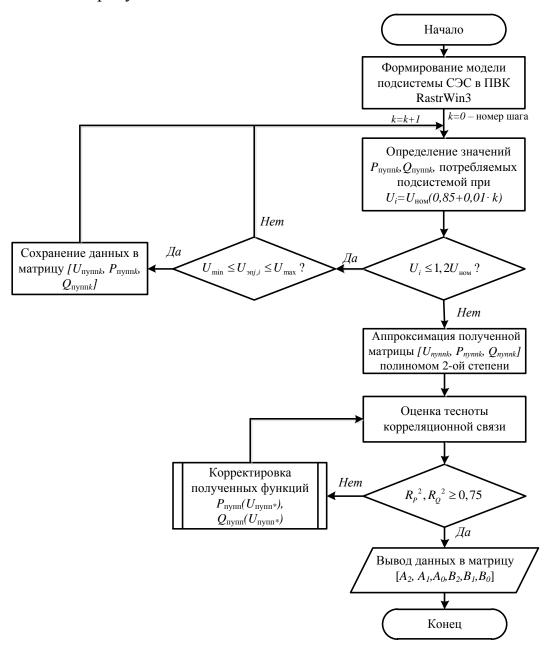


Рисунок 2.9 – Алгоритм определения эквивалентных статических характеристик нагрузки по напряжению

Сначала выполняется моделирование схемы сети, подключенной к ПУПП. Определяются параметры схемы замещения, статические характеристики нагрузки по напряжению.

Далее выполняется расчет электрического режима с последовательным изменением уровня напряжения на стороне ВН ПУПП с шагом 1% в  $0.85 \div 1.2 U_{\text{HOM}}$ . Данные пределы чтобы пределах заданы, определить допустимый диапазон изменения напряжения на шинах ВН ПУПП при котором соблюдаются требования к отклонениям напряжения на зажимах электроприемника. Диапазон варьируется в зависимости от каждого фактического ступени регулирования устройства ПБВ номера трансформатора ПУПП. Таким образом, на каждом k-ом шаге необходимо соответствие напряжения на зажимах электроприемников граничным условиям  $U_{\exists\Pi,min} \leq U_{\exists\Pi,i,i} \leq U_{\exists\Pi,max}$ , где  $U_{\exists\Pi,min}$ ,  $U_{\exists\Pi,max}$  – минимально И максимально допустимые значения напряжения на зажимах электроприемников.

Данные об уровне мощности, потребляемой ПУПП и прилегающей низковольтной сетью, сохраняются для последующего формирования статических характеристик нагрузки. При этом если фактический уровень напряжения на зажимах электроприемников не соответствует граничным условиям, данные не сохраняются и в дальнейших расчетах не учитываются.

Полученные данные о потреблении активной и реактивной мощности аппроксимируются полиномом 2-й степени и могут быть использованы в качестве эквивалента ПУПП и прилегающей низковольтной сети.

### 2.2.2. Влияние ПУПП на уровень потерь активной и реактивной мощности

Для оценки влияния ПУПП на уровень потребления активной и реактивной мощностей, необходимо проанализировать характер изменения потерь активной и реактивной мощностей [61].

Параметры схемы замещения ПУПП определяются по каталожным или паспортным данным. Необходимо учитывать, что на ПУПП имеются устройства переключения без возбуждения (ПБВ), положение которых оказывает влияние на параметры схемы замещения ПУПП.

Учитывая наличие устройства ПБВ, параметры схемы замещения ПУПП, приведенные к напряжению 6 кВ, определяются по следующим формулам:

$$R_{\text{ПУПП}} = \frac{\Delta P_{\text{K}} (U_{\text{HOM}} (1 + n \cdot \Delta U_{\text{CT}^*}))^2}{S_{\text{HOM}}^2 \cdot 10^3},$$
 (2.14)

где  $R_{\Pi Y \Pi \Pi}$  — активное сопротивление ПУПП (Ом),  $\Delta P_{\kappa}$  — потерь короткого замыкания (кВт),  $U_{\text{ном}}$  — номинальное напряжение (кВ),  $S_{\text{ном}}$  — номинальная мощность ПУПП (кВА), n — номер отпайки ПБВ,  $\Delta U_{\text{ст}*}$  — шаг регулирования УРПН, %;

$$Z_{\Pi Y \Pi \Pi} = \frac{u_{k\% \text{ otb}} (U_{\text{HOM}} (1 + n \cdot \Delta U_{\text{CT}^*}))^2}{100 \cdot S_{\text{HOM}}}, \qquad (2.15)$$

где  $Z_{\Pi Y \Pi \Pi}$ — полное сопротивление ПУПП (Ом),  $u_{k\% \text{ отв}}$ — номинальное напряжение короткого замыкания,%.

$$X_{\Pi \text{YIIII}} = \sqrt{Z_{\Pi \text{YIIII}}^2 - R_{\Pi \text{YIIII}}^2}, \qquad (2.16)$$

где  $X_{\Pi \Pi \Pi}$  – индуктивное сопротивление ПУПП (Ом).

Учитывая общепринятые формулы для определения потерь активной и реактивной мощности в трансформаторах [62], а также формулы (2.14-2.16), потери активной и реактивной мощности в ПУПП можно определить по формулам:

$$\Delta P_{\text{пупп}}(U) = \frac{\left(k_{3} \cdot S_{\text{HOM}}\right)^{2}}{U^{2}} \frac{\Delta P_{\text{K}} \left(U_{\text{HOM}} \left(1 + n \cdot \Delta U_{\text{cr*}}\right)\right)^{2}}{S_{\text{HOM}}^{2} \cdot 10^{3}} + \Delta P_{\text{x}} \cdot \left(\frac{U}{U_{\text{HOM}}}\right)^{2}, \tag{2.17}$$

$$\Delta Q_{\text{пупп}}(U) = \frac{\left(k_{_{3}} \cdot S_{_{\text{HOM}}}\right)^{2}}{U^{2}} \frac{\left(U_{_{\text{HOM}}}(1 + n \cdot \Delta U_{_{\text{CT}^{*}}})\right)^{2}}{S_{_{\text{HOM}}}} \cdot \sqrt{\frac{u_{_{k\%\text{OTB}}}^{2}}{10000} - \frac{\Delta P_{_{K}}^{2}}{S_{_{\text{HOM}}}^{2}}} + \Delta Q_{_{X}} \cdot \left(\frac{U}{U_{_{\text{HOM}}}}\right)^{2}, \quad (2.18)$$

где  $\Delta P_{\rm x}$ ,  $\Delta Q_{\rm x}$  — активные и реактивные потери холостого хода (кВАр),  $k_{\rm 3}$  — коэффициент загрузки силового трансформатора;

Принимая, что устройство ПБВ находится в положении «-1» и  $U_{\mbox{\tiny Hom}}$  равно 6 кВ получим следующие выражения:

$$\Delta P_{\text{пупп}}(U) = \frac{34, 2 \cdot k_3^2 \cdot \Delta P_{\text{K}}}{U^2} + \Delta P_{\text{X}} \cdot \left(\frac{U}{U_{\text{HOM}}}\right)^2, \qquad (2.19)$$

$$\Delta Q_{\text{пупп}}(U) = \frac{34, 2 \cdot k_{_{3}}^{2} \cdot S_{_{\text{HOM}}}}{U^{2}} \sqrt{\frac{u_{_{K}}^{2}}{10000} - \frac{\Delta P_{_{K}}^{2}}{S_{_{\text{HOM}}}^{2}}} + \Delta Q_{_{X}} \cdot \left(\frac{U}{U_{_{\text{HOM}}}}\right)^{2}, \qquad (2.20)$$

Статические характеристики потерь активной и реактивной мощности по напряжению, построенные по выражениям (2.19) и (2.20) для ПУПП марки КТПВ-1000/6 представлены на рисунке 2.10.

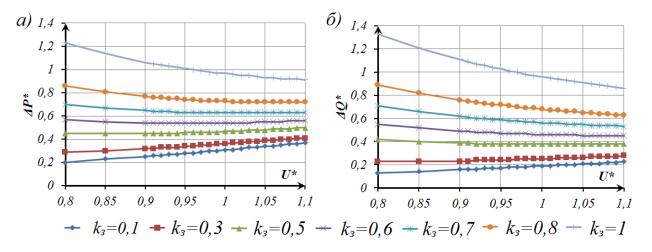


Рисунок 2.10 – Зависимость потерь активной (а) и реактивной (б) мощности от уровня напряжения питающей сети при различных значениях коэффициента загрузки ПУПП марки КТПВ-1000/6

Также был выполнен анализ регулирующих эффектов потерь активной и реактивной мощности по напряжению для ПУПП различных номиналов [63]. Графики зависимости регулирующих эффектов потерь активной и реактивной мощности для ПУПП в зависимости от коэффициента загрузки представлены на рисунке 2.11.

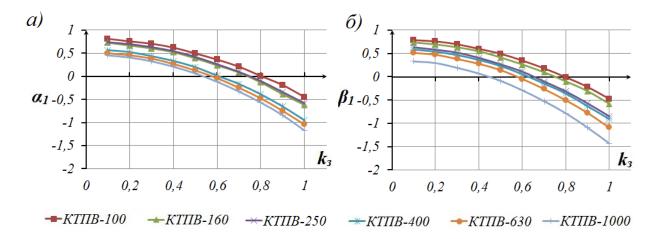


Рисунок 2.11 — Регулирующие эффекты потерь активной (а) и реактивной (б) мощности по напряжению для ПУПП в зависимости от коэффициента загрузки  $k_3$ 

Данные рисунков 2.10-2.11 позволяют сделать следующие выводы:

- при  $k_3 = 0,6-0,7$  потери мощности в ПУПП практически не зависят от уровня напряжения. При этом согласно [44] при такой загрузке КПД трансформатора имеет максимальное значение. Следовательно, если загрузка трансформатора соответствует максимальному КПД, уровень потерь мощности в трансформаторе практически не зависит от напряжения;
- характер изменения потерь активной мощности в ПУПП неоднозначен и зависит от коэффициента загрузки и соотношения  $\Delta P_{\kappa}$  и  $\Delta P_{\kappa}$ ;
- с увеличением загрузки ПУПП регулирующий эффект потерь активной и реактивной мощности становится отрицательным. При загрузке ниже критического значения уровень потерь активной мощности возрастает;
- регулирующий эффект потерь активной мощности в ПУПП изменяется в пределах от –1,17 до 0,51;
- регулирующий эффект потерь реактивной мощности в ПУПП изменяется в пределах от −1,53 до 0,79;
- статические характеристики потерь реактивной мощности по напряжению имеют более крутой характер и регулирующий эффект потерь реактивной мощности в ПУПП по напряжению более значителен;

 с увеличением номинальной мощности ПУПП значение критической загрузки, при которой наблюдается отрицательный эффект в отношении уровня потерь активной и реактивной мощностей, уменьшается.

# 2.2.3. Определение эквивалентных статических характеристик нагрузки по напряжению для ПУПП

С использованием вышеуказанного алгоритма были получены обобщенные статические характеристики нагрузки для различного состава нагрузки ПУПП на примере угольной шахты АО «Шахта имени С.М. Кирова». Рассматриваемый состав электроприемников ПУПП представлен в Приложении 1.

Используя ПВК RastrWin3, было выполнено моделирование сети прилегающей к ПУПП при различных коэффициентах загрузки оборудования. Модели, созданные в ПВК RastrWin3, представлены в Приложении 1. В результате были получены эквивалентные статические характеристики активной и реактивной нагрузки по напряжению при различных коэффициентах загрузки электроприемников. Также были определены допустимые отклонения напряжения на зажимах ПУПП в нейтральном положении анцапфы устройства ПБВ. Полученные результаты представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Полученные значения коэффициентов полинома 1-й степени для ПУПП и питающейся от них низковольтной сети

	ΣΡ <sub>н</sub> , κΒτ	$k_{_3}$	Коз	эффициен	Допустимый диапазон						
№ п/п			по активной мощности			по реактивной мощности			отклонения		
									напряжения на		
									зажимах ПУПП		
			$A_2$	$A_1$	$A_{0}$	$B_2$	$\boldsymbol{B}_{1}$	$\boldsymbol{B}_{0}$	$U_{min} \leq U \leq U_{max}$		
ПУПП №1	1074	1	0,073	-0,223	1,15	4,65	-8,39	4,74	$0.98U_{\text{HOM}} \le U \le 1.13U_{\text{HOM}}$		
		0,8	0,053	-0,148	0,895	3,63	-6,19	3,36	$0.96U_{\text{HOM}} \le U \le 1.12U_{\text{HOM}}$		
		0,6	0,04	-0,082	0,641	2,66	-4,1	2,04	$0.95U_{\text{HOM}} \le U \le 1.12U_{\text{HOM}}$		
		0,4	0,028	-0,049	0,421	2,1	-2,7	1	$0.94U_{\text{HOM}} \leq U \leq 1.11U_{\text{HOM}}$		
ПУПП №2	2000	1,0	0,083	-0,323	1,240	4,3	-7,79	4,49	$U_{\scriptscriptstyle{ ext{HOM}}} \leq U \leq 1,14 U_{\scriptscriptstyle{ ext{HOM}}}$		
		0,8	0,061	-0,228	0,967	3,33	-5,7	3,17	$0.98U_{\text{HOM}} \leq U \leq 1.13U_{\text{HOM}}$		
		0,6	0,046	-0,142	0,695	2,36	-3,5	1,74	$0.97U_{\text{HOM}} \le U \le 1.13U_{\text{HOM}}$		
						0,4	0,032	-0,089	0,457	1,9	-2,5

		$k_{_3}$	Коэффициенты полинома 1-й степени						Допустимый диапазон
№ п/п	ΣΡ <sub>н</sub> , κΒτ		по активной мощности			по реактивной мощности			отклонения напряжения на
									зажимах ПУПП
			$A_2$	$A_1$	$A_{\it 0}$	$B_2$	$\boldsymbol{B}_{1}$	$\boldsymbol{B}_{0}$	$U_{min} \leq U \leq U_{max}$
		1,0	0,076	-0,273	1,197	4,55	-8,22	4,67	$0.97U_{\text{HOM}} \le U \le 1.13U_{\text{HOM}}$
ПУПП №3	1200	0,8	0,055	-0,164	0,909	3,52	-6,09	3,37	$0.96U_{\text{HOM}} \le U \le 1.12U_{\text{HOM}}$
	1200	0,6	0,041	-0,118	0,677	2,62	-4,1	2,08	$0.94U_{\text{HOM}} \le U \le 1.12U_{\text{HOM}}$
		0,4	0,027	-0,061	0,434	2,05	-2,7	1,05	$0.94U_{\text{HOM}} \le U \le 1.11U_{\text{HOM}}$
		1,0	0,068	-0,175	1,107	4,85	-8,32	4,47	$0.96U_{\text{HOM}} \le U \le 1.14U_{\text{HOM}}$
ПУПП №4	947	0,8	0,050	-0,132	0,882	3,92	-6,19	3,07	$0.95U_{\text{HOM}} \leq U \leq 1.13U_{\text{HOM}}$
	<i>741</i>	0,6	0,035	-0,066	0,631	3,42	-5,1	2,28	$0.95U_{\text{HOM}} \leq U \leq 1.13U_{\text{HOM}}$
		0,4	0,023	-0,040	0,417	2,39	-2,9	0,91	$0,94U_{\text{HOM}} \leq U \leq 1,12U_{\text{HOM}}$
ПУПП №5	631	1,0	0,068	-0,175	1,107	4,95	-8,32	4,37	$0.95U_{\text{HOM}} \le U \le 1.13U_{\text{HOM}}$
		0,8	0,050	-0,132	0,882	3,92	-6,19	3,07	$0.94U_{\text{HOM}} \leq U \leq 1.12U_{\text{HOM}}$
		0,6	0,035	-0,066	0,631	3,52	-5,1	2,18	$0.93U_{\text{HOM}} \le U \le 1.11U_{\text{HOM}}$
		0,4	0,023	-0,040	0,417	2,55	-2,9	0,75	$0.93U_{\text{HOM}} \le U \le 1.11U_{\text{HOM}}$
ПУПП №6	56	1,0	0,058	-0,155	1,097	3,56	-7,13	4,56	$0.94U_{\text{HOM}} \leq U \leq 1.12U_{\text{HOM}}$
		0,8	0,045	-0,100	0,855	2,92	-6,49	4,37	$0.93U_{\text{HOM}} \le U \le 1.11U_{\text{HOM}}$
		0,6	0,035	-0,054	0,619	2,22	-5,9	4,28	$0.92U_{\text{HOM}} \le U \le 1.1U_{\text{HOM}}$
		0,4	0,023	-0,016	0,393	1,29	-4,6	3,71	$0.91U_{\text{HOM}} \le U \le 1.1U_{\text{HOM}}$

На рисунках 2.12-2.13 представлены статические характеристики потерь активной мощности в электрической сети, в ПУПП и суммарных потерь активной мощности при коэффициентах загрузки  $k_3$ =0,4;0,6;0,8;1. Штриховыми линиями на рисунках 2.12-2.13 приведены статические характеристики потерь активной мощности в случае не учета статических характеристик нагрузки (СХН).

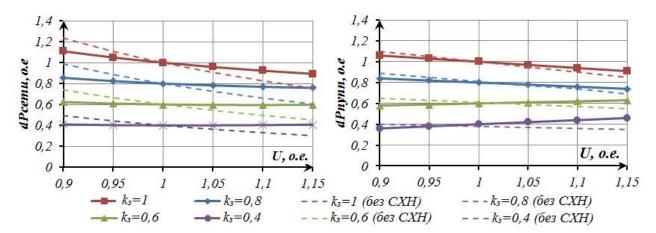


Рисунок 2.12 – Статические характеристики потерь активной мощности в сети (а) и в ПУПП (б) при различных коэффициентах загрузки с учетом и без учета СХН

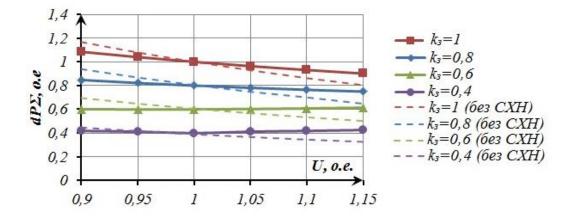


Рисунок 2.13 – Статические характеристики суммарных потерь активной мощности при различных коэффициентах загрузки ПУПП без учета и с учетом СХН

Из полученных статических характеристик можно сделать следующие выводы:

- 1. Для ПУПП №1, питающей очистной комплекс ( $Joy\ 4LS20$ ), при коэффициенте загрузки  $k_3 = 0.4$  суммарный уровень потерь активной имеет минимальную величину при напряжении  $U_{\text{ном}}$ . При ПУПП оптимальный увеличении загрузки напряжения уровень увеличивается, при уменьшении коэффициента загрузки оптимальный уровень напряжения на зажимах ПУПП уменьшается. При загрузке ПУПП  $k_3 \ge 0.7$  оптимальный уровень напряжения соответствует верхнему пределу напряжения.
- 2. ПУПП **№**2. питающей скребковый Для конвейер, коэффициенте загрузки  $k_3 = 0,3$ суммарный уровень потерь активной мощности имеет минимальную величину при напряжении  $U_{\scriptscriptstyle ext{HOM}}$ . При ПУПП загрузки оптимальный уровень напряжения увеличении увеличивается, при уменьшении коэффициента загрузки оптимальный уровень напряжения на зажимах ПУПП уменьшается. При загрузке ПУПП  $k_3 \ge 0.5$  оптимальный уровень напряжения соответствует верхнему пределу напряжения.

- 3. Для ПУПП №3, питающей насосную станцию, при коэффициенте загрузки  $k_3$ =0,35 суммарный уровень потерь активной мощности имеет минимальную величину при напряжении  $U_{\text{ном}}$ . При увеличении загрузки ПУПП оптимальный уровень напряжения увеличивается, при уменьшении коэффициента загрузки оптимальный уровень напряжения на зажимах ПУПП уменьшается. При загрузке ПУПП  $k_3$ >0,55 оптимальный уровень напряжения соответствует верхнему пределу напряжения.
- 4. Для ПУПП №4-5, питающей приводную станцию конвейера, при коэффициенте загрузки  $k_3$ =0,4 суммарный уровень потерь активной мощности имеет минимальную величину при напряжении  $U_{\text{ном}}$ . При увеличении загрузки ПУПП оптимальный уровень напряжения увеличивается, при уменьшении коэффициента загрузки оптимальный уровень напряжения на зажимах ПУПП уменьшается. При загрузке ПУПП  $k_3$ >0,5 оптимальный уровень напряжения соответствует верхнему пределу напряжения.
- 5. Для ПУПП *№*6, питающей натяжную станцию, при коэффициенте загрузки  $k_3=0,7$ суммарный уровень потерь активной мощности имеет минимальную величину при напряжении  $U_{\scriptscriptstyle ext{HOM}}$ . При ПУПП увеличении загрузки оптимальный уровень напряжения увеличивается, при уменьшении коэффициента загрузки оптимальный уровень напряжения на зажимах ПУПП уменьшается. При загрузке ПУПП  $k_3 \ge 0.8$  оптимальный уровень напряжения соответствует верхнему пределу напряжения.

Значение коэффициента загрузки  $k_3$ , при котором минимальный уровень потерь активной мощности соответствует  $U_{\text{ном}}$ , определяется составом нагрузки, а также протяженностью низковольтных сетей. При увеличении единичной мощности электродвигателей и уменьшении протяженности низковольтных сетей значение коэффициента загрузки, при котором минимальный уровень потерь активной мощности соответствует номинальному напряжению, уменьшается.

# 2.3. Определение обобщенных статических характеристик СЭС угольной шахты

## 2.3.1. Особенности изменения уровня потерь активной мощности в силовых трансформаторах

На ГПП угольных шахт устанавливаются трансформаторы с высшим напряжением 35 и 110 кВ с номинальной мощностью от 1600 до 40000 кВА. Технические характеристики трансформаторов, установленных на ГПП, представлены в таблице 2.5. Все трансформаторы оснащены устройствами РПН.

Таблица 2.5 – Технические характеристики силовых трансформаторов, устанавливаемых на ГПП угольных шахт

Марка	$S_{\text{hom}}$ ,	$U_{\scriptscriptstyle  m H}$	$\kappa B$	$\Delta P_{\mathrm{x}}$ ,	$\Delta P_{\kappa}$ ,	$i_{x}$ ,	$u_{k\%{ m otb}}$
трансформатора	кВА	BH	НН	кВт	кВт	%	,%
TMH-2500/35	2500	35	6,3	5,1	23,5	1,1	6,5
TMH-4000/35	4000	35	6,3	6,7	33,5	1,0	7,5
TMH-6300/35	6300	35	6,3	9,25	46,5	0,9	7,5
TMH-10000/35	10000	35	6,3	12,0	65,0	0,8	7,5
ТДН-16000/35	16000	35	6,3	12,94	90	0,6	10
ТРДН-25000/110	25000	110	6,3 (6,6)	15,94	122,26	0,45	10,74
ТРДН-40000/110	40000	110	6,3 (6,6)	31,4	179,61	0,55	10,4

Известно, что при переключении УРПН происходит изменение числа витков в обмотке высшего напряжения, а также меняется магнитный поток [23,62]. Наиболее распространенная схема соединений УРПН с диапазоном регулирования  $\pm 9 \times 1,78\%$  приведена на рисунке 2.14.

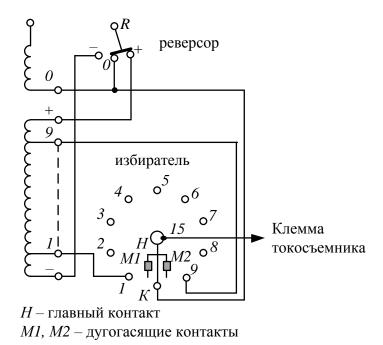


Рисунок 2.14 – Схема соединения УРПН

В положении реверсора «+» регулировочная обмотка включается согласно с основной обмоткой трансформатора, при этом происходит увеличение магнитного потока и коэффициента трансформации. Также увеличивается активное и индуктивное сопротивление трансформатора. При переключении реверсора В положение «-» регулировочная обмотка основной, уменьшение встречно при происходит включается ЭТОМ магнитного потока и коэффициента трансформации, а также увеличение активного сопротивления и уменьшение индуктивного сопротивления.

Параметры схемы замещения силовых трансформаторов с УРПН могут быть определены по паспортным или каталожным данным.

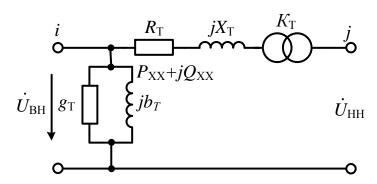


Рисунок 2.15 – Схема замещения двухобмоточного трансформатора

В большинстве случаев, параметры схемы замещения силового трансформатора (рисунок 2.15) определяются по формулам [20,23]:

$$R_{\rm T} = \frac{\Delta P_{\rm K} \cdot U_{\rm HOM}^{2}}{S_{\rm HOM}^{2} \cdot 10^{3}},$$
 (2.21)

$$Z_{\rm T} = \frac{u_{k\% \, \text{otb}} U_{\text{otb}}^{2}}{S_{\text{HOM}} \cdot 100},\tag{2.22}$$

$$X_{\rm T} = \sqrt{Z_{\rm T}^2 - X_{\rm T}^2},\tag{2.23}$$

где  $\Delta P_{\rm K}$  — потери короткого замыкания (кВт),  $U_{\rm HoM}$  — номинальное линейное напряжение основного ответвления обмотки (кВ),  $U_{\rm OTB}$  — номинальное линейное напряжение ответвления обмотки (кВ),  $S_{\rm HoM}$  — номинальная мощность трансформатора (МВА),  $u_{\rm k\%otb}$  — расчетное значение напряжение короткого замыкания ответвления, приведенной к номинальной мощности трансформатора на нейтральной отпайке УРПН,%.

Номинальное линейное напряжение ответвления обмотки может быть определено по формуле:

$$U_{\text{OTB}} = U_{\text{HOM}} (1 + n \cdot \Delta U_{\text{CT}^*}), \tag{2.24}$$

где n — номер анцапфы УРПН, изменяющийся в пределах, определяемых типом устройства РПН,  $\Delta U_{\rm cr}*$  — шаг регулирования УРПН, %;

При определении параметров схемы замещения по формулам (2.21-2.23) не учитывается зависимость активного сопротивления от числа витков регулировочной обмотки в процессе переключения УРПН.

Реальные зависимости активных сопротивлений обмоток от номера анцапфы (ответвления) по паспортным данным трансформаторов типа ТДН-16000/35, ТРДН-25000/110 и ТРДН-40000/110  $R_{\rm пасп} = f(n)$  представлены на рисунке 2.16.

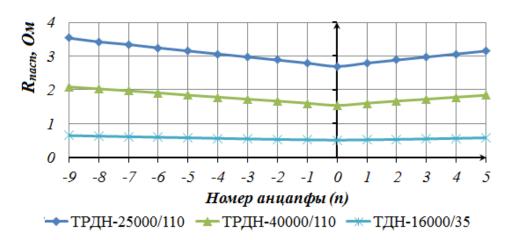


Рисунок 2.16 – Зависимости  $R_{\text{пасп}} = f(n)$ 

В результате аппроксимации полученных графиков  $R_{\text{пасп}} = f(n)$  полиноминальной функцией 2-й степени в среде MATLAB были получены следующие регрессионные зависимости:

– для трансформатора марки ТДН-16000/35

$$R_{\rm T}(n_{\rm T}) = 0.0004 \cdot |n_{\rm T}|^2 + 0.012 \cdot |n_{\rm T}| + 0.5047,$$
 (2.25)

– для трансформатора марки ТРДН-25000/110,

$$R_{\rm T}(n_{\rm T}) = 0.0003 \cdot |n_{\rm T}|^2 + 0.0893 \cdot |n_{\rm T}| + 2.6968,$$
 (2.26)

– для трансформатора марки ТРДН-40000/110

$$R_{\rm T}(n_{\rm T}) = 0.00008 \cdot |n_{\rm T}|^2 + 0.0616 \cdot |n_{\rm T}| + 1.5384,$$
 (2.27)

Коэффициенты детерминации  $R^2$  этих зависимостей, рассчитанные в среде MATLAB, равны единице, следовательно, полученные зависимости (2.25-2.27) полностью соответствуют наблюдаемым данным и являются функциональными[18].

При отсутствии информации об активных и полных сопротивлениях обмотки на каждой анцапфе УРПН, используются формулы:

$$R_{\rm T} = \frac{\Delta P_{\rm K} (U_{\rm HOM} (1 + |n| \cdot \Delta U_{\rm CT}^*))^2}{S_{\rm HOM}^2 \cdot 10^3},$$
 (2.28)

При этом полученные значения коэффициентов детерминации  $(R^2)$  и средних ошибок аппроксимации  $(\bar{A})$  составляют: ТРДН-25000/110  $(R^2$ =0,896;

 $\overline{A}$  = 2,73%), ТРДН-40000/110 ( $R^2$ =0,799;  $\overline{A}$  = 4,26%), ТДН-16000/35 ( $R^2$ =0,86;  $\overline{A}$  = 2,62%). Это свидетельствует о сильной корреляции паспортных данных трансформатора с функцией (2.28). Зависимости  $R_{\text{расч}}=f(n)$ , полученные по формуле (2.28), для трансформаторов марки ТРДН-25000/110, ТРДН-40000/110, ТДН-16000/35 представлены на рисунке 2.14.

Положения УРПН «6-9» не рассматриваются, т.к. соответствуют номинальным линейным напряжениям ответвлений 127,2 — 133,4 кВ, что выше максимально допустимого напряжения для электрооборудования согласно п.2.4 [64].

Силовые трансформаторы оказывают влияние на уровень потребляемой активной и реактивной мощности, которое заключается в изменении уровня потерь активной мощности в трансформаторе.

В общем случае потери активной  $\Delta P_{\scriptscriptstyle \rm T}$  (кВт) и реактивной  $\Delta Q_{\scriptscriptstyle \rm T}$  (кВАр) мощности в трансформаторе определяются по формулам:

$$\Delta P_{\mathrm{T}} = \frac{\left(k_{\mathrm{3}} \cdot S_{\mathrm{HOM}}\right)^{2}}{U^{2}} R_{\mathrm{T}} \cdot 1000 + \Delta P_{\mathrm{x}} \cdot \left(\frac{U}{U_{\mathrm{HOM}}}\right)^{2}, \qquad (2.29)$$

$$\Delta Q_{\mathrm{T}} = \frac{\left(k_{_{3}} \cdot S_{_{\mathrm{HOM}}}\right)^{2}}{U^{2}} X_{_{\mathrm{T}}} \cdot 1000 + \Delta Q_{_{\mathrm{X}}} \cdot \left(\frac{U}{U_{_{\mathrm{HOM}}}}\right)^{2}, \tag{2.30}$$

где  $k_3$  — коэффициент загрузки силового трансформатора;  $\Delta P_{\rm x}, \Delta Q_{\rm x}$  — активные и реактивные потери холостого хода.

Уровень потерь активной и реактивной мощности в трансформаторе с учетом выражений (2.22 - 2.23) и (2.28) можно оценить по формулам:

$$\Delta P_{_{\rm T}}(n) = \frac{k_3^2 \cdot \Delta P_{_{\rm K}}(U_{_{\rm HOM}}(1 + |n| \cdot \Delta U_{_{\rm CT^*}}))^2}{U^2} + \Delta P_{_{\rm X}} \cdot \left(\frac{U}{U_{_{\rm HOM}}}\right)^2, \tag{2.31}$$

$$\Delta Q_{\rm T}(n) = \frac{k_{\rm g}^2 \cdot S_{\rm HOM} \cdot U_{\rm HOM}^2 \cdot 10}{U^2} \sqrt{u_{k\%oTB}^2 \left(1 + n \cdot \Delta U_{\rm CT}^*\right)^4 - \frac{\Delta P_{\rm g}^2 \left(1 + \left|n\right| \cdot \Delta U_{\rm CT}^*\right)^4}{S_{\rm HOM}^2 \cdot 100}} + \Delta Q_{\rm x} \cdot \left(\frac{U}{U_{\rm HOM}}\right)^2, \quad (2.32)$$

Расчет потерь активной и реактивной мощности по формулам (2.31-2.32) позволяет учесть зависимость активного сопротивления трансформатора от положения анцапфы УРПН.

Из формул (2.31 – 2.32) следует, что на уровень потерь активной и реактивной мощности в трансформаторе влияет коэффициент загрузки трансформатора, номер анцапфы УРПН и уровень напряжения в питающей сети.

Формулы (2.31 – 2.32) целесообразно рассмотреть при увеличении и уменьшении коэффициента трансформации относительно номинального.

Важно отметить, что при работе устройства АРНТ в режиме стабилизации, номер анцапфы УРПН подстраивается под напряжение питающей сети. Таким образом, при увеличении напряжения в питающей сети происходит переключении анцапфы УРПН и увеличении сопротивления трансформатора.

При увеличении коэффициента трансформации (переключение анцапф в «+») уровень потерь активной и реактивной мощности в трансформаторе определяется по формулам:

$$\Delta P_{\mathrm{T}}(n) = k_{\mathrm{3}}^{2} \cdot \Delta P_{\mathrm{K}} + \Delta P_{\mathrm{X}} \cdot \left(1 + n \cdot \Delta U_{\mathrm{CT}^{*}}\right)^{2}, \tag{2.33}$$

$$\Delta Q_{\rm T}(n) = k_{\rm 3}^2 \cdot S_{\rm HOM} \cdot 10 \cdot \sqrt{u_{k\%_{\rm OTB}}^2 - \frac{\Delta P_{\kappa}^2}{S_{\rm HOM}^2 \cdot 100}} + \Delta Q_{\rm x} \cdot (1 + n \cdot \Delta U_{\rm cr}^*)^2, \qquad (2.34)$$

Формула (2.33) показывает, что при повышении напряжения в питающей сети и регулировании напряжения устройством АРНТ в режиме «стабилизации» происходит увеличение уровня потерь активной мощности в трансформаторе за счет роста потерь холостого хода. При этом уровень нагрузочных потерь остается неизменным.

В условиях понижения напряжения в питающей сети и переключении анцапф в отрицательные положения, потери активной и реактивной мощности в трансформаторе определяются по формулам:

$$\Delta P_{\rm T}(n) = \frac{k_{\rm 3}^2 \cdot \Delta P_{\rm K} (1 + |n| \cdot \Delta U_{\rm CT*})^2}{(1 + n \cdot \Delta U_{\rm cr*})^2} + \Delta P_{\rm X} \cdot (1 + n \cdot \Delta U_{\rm cr*})^2, \qquad (2.35)$$

$$\Delta Q_{\rm T}(n) = \frac{k_{\rm 3}^2 \cdot S_{\rm HOM} \cdot 10}{(1 + n \cdot \Delta U_{\rm cr*})^2} \sqrt{u_{k\% \rm OTB}^2 \left(1 + n \cdot \Delta U_{\rm cr*}\right)^4 - \frac{\Delta P_{\rm K}^2 \left(1 + |n| \cdot \Delta U_{\rm cr*}\right)^4}{S_{\rm HOM}^2} \cdot 100} + \Delta Q_{\rm X} \cdot \left(1 + n \cdot \Delta U_{\rm cr*}\right)^2, \qquad (2.36)$$

Формула (2.35) показывает, что при понижении напряжения питающей сети и переключении анцапф в отрицательные положения происходит значительное увеличение потерь активной мощности, связанное с увеличением токовой нагрузки и увеличением сопротивления трансформатора.

Графики зависимостей  $\Delta P^*$ ,  $\Delta Q^* = f(n)$  в относительных единицах при переключении устройства РПН устройством АРНТ в режиме «стабилизации» и различных коэффициентах загрузки трансформатора представлены на рисунке 2.17.

Отметим, что при граничном коэффициенте загрузки трансформатора  $k_{3 {\rm гp}}$  минимум потерь активной мощности в трансформаторе не соответствует нейтральному положению анцапфы.

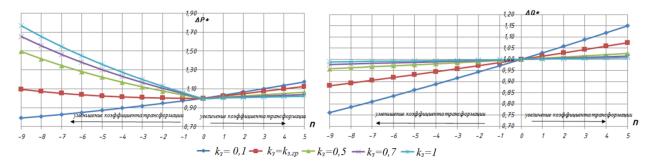


Рисунок 2.17 — Графики зависимостей  $\Delta P^*$ ,  $\Delta Q^* = f(n)$  при различных коэффициентах загрузки трансформатора  $k_3$ 

Надо отметить, что зависимости, представленные на рисунке 2.17, справедливы в том случае, если напряжение в сети соответствуют напряжению анцапф УРПН. При колебаниях напряжения в пределах одной отпайки УРПН, напряжения когда отклонения находятся нечувствительности (зона НЧ) устройства АРНТ ( $U_{\text{нч}}=1,2-1,5\Delta U_{\text{ст}}$ ), потери активной мощности изменяются соответствии графиками, В cпредставленными на рисунке 2.18.

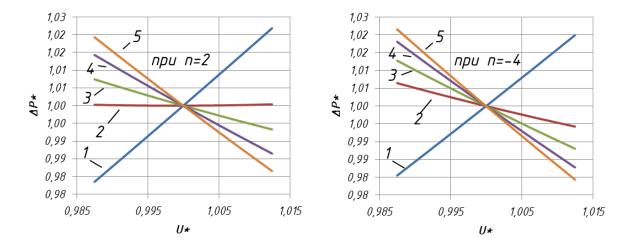


Рисунок 2.18— Изменение потерь активной мощности в трансформаторе при разных положениях УРПН и колебаниях напряжения в пределах зоны НЧ ( $U_{\text{нч}}=2,5\%$ ) и разных коэффициентах загрузки  $(1-\text{при }k_3=0,1;\ 2-\text{при }k_3=k_{\text{згр}}$  для  $n=2;\ 3-\text{при }k_3=0,5;\ 4-\text{при }k_3=0,7;\ 5-\text{при }k_3=1)$ 

По формулам (2.3 — 2.4) были рассчитаны регулирующие эффекты потерь активной и реактивной мощности силовых трансформаторов по напряжению. Графики зависимостей регулирующих эффектов потерь активной  $\alpha_1$  и реактивной мощности  $\beta_1$  трансформатора марки ТРДН-25000/110 в зависимости от коэффициента загрузки  $k_3$  и положения УРПН представлены на рис. 2.19.

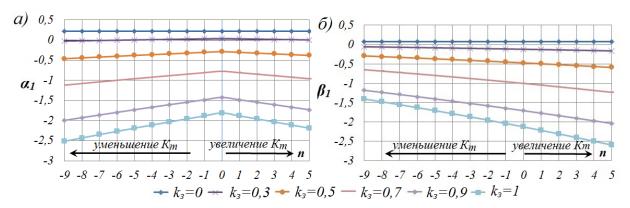


Рисунок 2.19 — Регулирующие эффекты потерь активной (а) и реактивной (б) мощности трансформатора марки ТРДН — 25000/110 в зависимости от коэффициента загрузки  $k_3$  при различных положениях УРПН

Зависимости, представленные на рисунках 2.18-2.19, позволяют сделать следующие выводы:

- 1. При  $k_3 > k_{3\text{гр}}$  минимальный уровень потерь активной мощности в трансформаторе соответствует нейтральному положению анцапфы УРПН. Значение  $k_{3\text{гр}}$  определяется соотношением потерь холостого хода и нагрузочных потерь.
- 2. При  $k_3 < k_{3\text{гр}}$  потери активной мощности, главным образом, определяются потерями холостого хода. В связи с этим, минимум  $\Delta P$  не наблюдается в нейтральном положении. Минимум функции  $\Delta P^* = f(n)$  смещается в отрицательном направлении.
- 3. При уменьшении коэффициента трансформации (переключение УРПН в «—») потери активной мощности увеличиваются пропорционально квадрату коэффициента загрузки трансформатора, положению анцапфы УРПН и обратно пропорционально квадрату уровня напряжения на вводах трансформатора. При этом с увеличением  $k_3$  потери активной мощности увеличиваются значительней.
- 4. При увеличении коэффициента трансформации (переключение УРПН в «+») нагрузочные потери трансформатора остаются практически неизменными, но увеличиваются потери холостого хода. Прирост потерь активной мощности более значителен по мере уменьшения  $k_3$ .
- 5. При изменении напряжения в пределах зоны нечувствительности устройства АРНТ, характер зависимости  $\Delta P^*=f(U)$  зависит от коэффициента загрузки трансформатора. При этом если  $k_3>k_{\rm 3rp}$  потери активной мощности уменьшаются при увеличении напряжения. Если  $k_3< k_{\rm 3rp}$ , потери активной мощности увеличиваются при увеличении напряжения в пределах зоны НЧ.  $k_{\rm 3ep}$  определяется соотношением потерь холостого хода и нагрузочных потерь, а также текущим положением УРПН.
- 6. Диапазон изменения потерь активной мощности в трансформаторе в различных положениях УРПН зависит от коэффициента загрузки трансформатора.

7. Потери реактивной мощности имеют линейную зависимость от коэффициента трансформации. При этом график изменения потерь реактиной мощности становится более пологим при увеличении загрузки трансформатора.

Таким образом, как показал анализ, изменение потерь активной мощности в силовых трансформаторах носит неоднозначный характер при работе УРПН на разных ответвлениях. Характер изменения потерь активной мощности определяется коэффициентом загрузки, шириной зоны НЧ, направлением переключения отпаек УРПН относительно нейтрального положения, соотношением потерь холостого хода и нагрузочных потерь. При этом потери реактивной мощности в трансформаторе имеют линейную зависимость от коэффициента трансформации.

В связи с вышесказанным при выполнении оптимизации уровня напряжения по критерию минимума потерь активной мощности необходимо учитывать зависимость потерь активной мощости в трансформаторе от номера ступени регулирования УРПН.

# 2.3.2 Обобщенные статические характеристики СЭС угольной шахты по напряжению

Для получения эквивалентных характеристик нагрузки необходимо выполнить моделирование СЭС угольной шахты до шин ВН ПУПП. При этом можно рассмотреть несколько типовых режимов работы СЭС в пределах одной рабочей смены.

На основании анализа графика электрических нагрузок были выделены следующие основные типовые режимы:

- 1. пиковый максимум;
- 2. полупиковый максимум;
- 3. пиковый минимум;
- 4. полупиковый минимум.

Для каждого из режимов на примере АО «Шахта им. С.М. Кирова» были получены обобщенные статические характеристики нагрузки для нагрузки ПС 35 кВ №111 Озерная (рисунок 2.20). Модель СЭС угольной шахты, разработанная в среде ПВК RastrWin 3, представлена в Приложении 1.

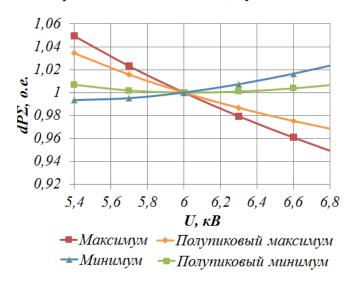


Рисунок 2.20 — Обобщенные статические характеристики потерь активной мощности по напряжению в типовых режимах СЭС угольной шахты

Данные рисунка 3.20 позволяют сделать вывод, что при увеличении нагрузки предприятия в режиме пикового максимума целесообразно поддерживать повышенное напряжение (6,6-6,8 кВ). При этом будет наблюдаться снижение уровня потерь активной мощности. В режиме пикового минимума целесообразно поддерживать пониженный уровень напряжения (5,8-6,2 кВ).

В промежуточных режимах оптимальный режим будет зависеть от состава нагрузки угольной шахты. При загрузке более мощных двигателей целесообразно увеличивать уровень напряжения значительнее, чем при загрузке маломощных двигателей.

Полученные эквивалентные статические характеристики нагрузки по напряжению свидетельствуют о необходимости их учета при регулировании напряжения и могут быть использованы при разработке рекомендаций по регулированию напряжения в условиях существующей системы

регулирования, а также в рамках планируемой к разработке системы оптимального регулирования напряжения.

#### 2.4. Выводы по главе 3

- 1. Разработан алгоритм определения коэффициентов полинома статических характеристик по напряжению двигательной нагрузки угольной шахты с учетом параметров схемы замещения, характеристик нагрузки, коэффициента загрузки двигателя. Данный алгоритм отличается от существующих алгоритмов одновременным использованием Т-образной схемы замещения АД, учетом кривых намагничивания и показателей степени момента нагрузки.
- 2. С использованием алгоритма выполнен анализ статических характеристик нагрузки по напряжению для АД различных типов и мощностей на угольных шахтах. В результате установлено, что изменение напряжения на 1% от номинального практически не приводит к изменению потребления активной мощности и, следовательно, она может приниматься постоянной.
- 3. Выявлено, что регулирующий реактивной нагрузки шахтовых АД по напряжению находится в пределах 0,95 2,60%. При этом его значение обратно пропорционально количеству пар полюсов, номинальной мощности и коэффициенту загрузки двигателя.
- 4. Разработан алгоритм определения эквивалентных статических характеристик нагрузки с использованием существующего программного комплекса для расчета режимов RastrWin3.
- 5. Установлено, что с увеличением загрузки ПУПП регулирующий эффект потерь активной и реактивной мощности становится отрицательным. При загрузке ниже критического значения уровень потерь активной мощности возрастает. Регулирующий эффект потерь активной (реактивной) мощности в ПУПП изменяется в пределах -1,17 ÷ 0,51 (-1,53 ÷ 0,79). При этом

- с увеличением коэффициента реактивной мощности усиливается регулирующий эффект ПУПП в отношении ее электроприемников.
- 6. Определены эквивалентные статические характеристики нагрузки для ПУПП. Выявлено, что оптимальный уровень напряжения на шинах ПУПП зависит от загрузки электроприемников, протяженности сети и единичной мощности электроприемников.
- 7. Изменение потерь активной мощности в силовых трансформаторах носит неоднозначный характер при работе УРПН на разных ответвлениях. Характер изменения потерь активной мощности определяется коэффициентом загрузки, шириной зоны нечувствительности, направлением переключения отпаек УРПН относительно нейтрального положения, соотношением потерь холостого хода и нагрузочных потерь.
- 8. Определены эквивалентные статические характеристики нагрузки для одной из угольных шахт. Установлено, что в режиме пикового максимума оптимальный уровень напряжения на шинах питающей ПС соответствует максимальному значению напряжения (6,6 6,8 кВ), в режиме пикового минимума соответствует минимальному значению напряжения (5,8 6,2 кВ). В режиме полупикового минимума оптимальный уровень напряжения соответствует промежуточным значениям в пределах (6,2-6,6 кВ).

3. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОПТИМАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ УГОЛЬНЫХ ШАХТ

### 3.1. Формулирование целевой функции оптимизации уровня напряжения по критерию минимума потерь активной мощности

Для разработки алгоритма оптимального регулирования напряжения в СЭС угольной шахты, представленной на рисунке 3.1, необходимо определить зависимые переменные, граничные условия и целевую функцию.

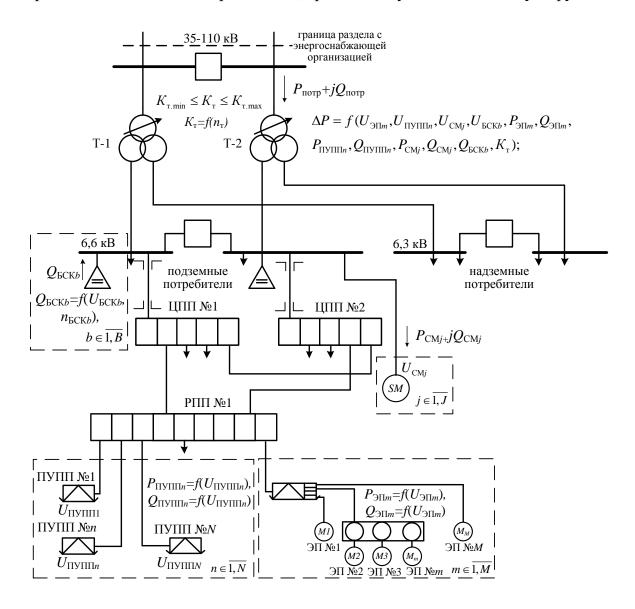


Рисунок 3.1 – Структурная схема СЭС угольной шахты при решении задачи оптимального регулирования напряжения

 $\overline{1,M}$ . Электроприемники (множество где Mколичество электроприемников контролируемым уровнем c нагрузки), группы электроприемников (множество  $\overline{1,N}$ , где N – количество ПУПП, питающих группу электроприемников, не имеющих устройств телеизмерений) имеют соответствующие статические характеристики нагрузки по напряжению. Кроме того, в СЭС угольной шахты могут быть представлены синхронные машины (множество  $\overline{1,J}$ , где J – количество синхронных машин), способные обеспечить недискретное регулирование уровня напряжения. При этом каждая синхронная машина имеет свою P, Q-диаграмму, определяющую пределы генерации (потребления) реактивной мощности. Трансформаторы ГПП оснащены устройствами регулирования под нагрузкой, позволяющие изменять коэффициент трансформации  $K_{\rm T}$  в заданных пределах.

Зависимые переменные представляют собой совокупность параметров СЭС, регулируя которые, возможно изменить значение целевой функции. Эти переменные могут быть дискретными или недискретными. В случае оптимизации режима СЭС по напряжению дискретными переменными являются: номер ступени регулирования УРПН трансформаторов ГПП  $n_{\rm T}$ , номер ступени регулирования БСК  $n_{\rm ECK}$ . Недискретными переменными являются значения генерации (потребление) реактивной мощности синхронными машинами  $Q_{\rm CM}$ .

Таким образом, регулирование напряжения в СЭС угольной шахты может осуществляться плавно (автоматическими регуляторами возбуждения, установленными на синхронных машинах) и ступенчато (автоматическими регуляторами, установленными на подстанциях и осуществляющими изменение коэффициентов трансформации силовых трансформаторов, т.е. УРПН, оснащенными АРНТ, а также включением и отключением БСК).

Целевая функция и граничные условия оптимизации уровня напряжения в СЭС угольной шахты по критерию минимума потерь активной мощности представлены в (3.1).

$$\begin{cases} \Delta P \rightarrow \min; \\ \Delta P = f\left(U_{\Im\Pi m}, U_{\Pi \Im\Pi\Pi n}, U_{CMj}, U_{BCKb}, P_{\Im\Pi m}, Q_{\Im\Pi m}, P_{\Pi \Im\Pi\Pi n}, Q_{\Pi \Im\Pi\Pi n}, P_{CMj}, Q_{CMj}, Q_{BCKb}, K_{\scriptscriptstyle T}\right); \\ P_{\Im\Pi m} = f\left(U_{\Im\Pi m}\right), Q_{\Im\Pi m} = f\left(U_{\Im\Pi m}\right), P_{\Pi \Im\Pi\Pi n} = f\left(U_{\Pi \Im\Pi\Pi n}\right), Q_{\Pi \Im\Pi\Pi n} = f\left(U_{\Pi \Im\Pi\Pi n}\right); \\ K_{\scriptscriptstyle T} = f\left(n_{\scriptscriptstyle T}\right), Q_{BCKb} = f\left(U_{BCKb}, n_{BCKb}\right); m \in \overline{1, M}; n \in \overline{1, N}; j \in \overline{1, J}; b \in \overline{1, B}; \\ K_{\scriptscriptstyle T.MH} \leq K_{\scriptscriptstyle T} \leq K_{\scriptscriptstyle T.MHH}; Q_{CM.MHH j} \leq Q_{CMj} \leq Q_{CM.Makc j}; \\ U_{\Im\Pi.MH m} \leq U_{\Im\Pi m} \leq U_{\Im\Pi m} \leq U_{\Im\Pi.Makc m}; U_{\Pi \Im\Pi\Pi MH n} \leq U_{\Pi \Im\Pi\Pi m} \leq U_{\Pi \Im\Pi\Pi Makc n}; \\ U_{CM MH j} \leq U_{CMj} \leq U_{CM Makc j}; U_{BCK MH b} \leq U_{BCKb} \leq U_{BCK Makc b}; \end{cases}$$

$$(3.1)$$

где  $\Delta P$  — потери активной мощности в СЭС угольной шахты; B количество БСК;  $U_{ЭПm}$ ,  $U_{ПУППn}$ ,  $U_{CMi}$ ,  $U_{БСКb}$  – уровень напряжения в узлах СЭС;  $U_{\Pi Y \Pi \Pi. M u H n}$ ,  $U_{\Pi Y \Pi \Pi. M a K c n}$ ,  $U_{\exists \Pi. M u H n}$ ,  $U_{\exists \Pi. M a K c n}$ ,  $U_{CM. M u H i}$ ,  $U_{CM. M u H i}$ ,  $U_{CM. M a K c i}$ ,  $U_{ECK. M u H b}$ ,  $U_{\text{БСК.макс}b}$  – максимальные и минимальные ограничения по напряжения, определяемые требованиями ГОСТ, паспортными данными электрооборудования;  $Q_{\text{СМ.мин}}$ ,  $Q_{\text{СМ.макс}}$  максимальные и минимальные ограничения по уровню потребления (генерации) реактивной мощности, определяемые паспортными данными синхронных машин и Р-Q диаграммой;  $P_{\exists \Pi m} = f(U_{\exists \Pi m}), \quad Q_{\exists \Pi m} = f(U_{\exists \Pi m})$  – статические характеристики нагрузки по напряжению для m-ого электроприемника угольной шахты,  $P_{\Pi \text{УПП}n} = f(U_{\Pi \text{УПП}n})$ ,  $Q_{\Pi \Pi \Pi \Pi} = f(U_{\Pi \Pi \Pi \Pi})$  – статические характеристики нагрузки по напряжению для группы электроприемников;  $Q_{\mathsf{ECK}b}$ – реактивная генерируемая b-ой БСК,  $K_{\text{т.мин}}$ ,  $K_{\text{т.макс}}$  – минимальный и максимальный коэффициенты трансформации трансформатора ГПП.

### 3.2. Алгоритм определения оптимального уровня напряжения

С учетом полученной целевой функции (3.1) был разработан алгоритм определения оптимального уровня напряжения в СЭС угольной шахты по критерию минимума потерь активной мощности (рисунок 3.2).

Алгоритм предполагает раздельное выполнение операций расчета параметров текущего режима и его оптимизации. Это позволяет осуществлять мониторинг состояния СЭС угольной шахты и обеспечивать

максимальную эффективность использования устройств регулирования напряжения.

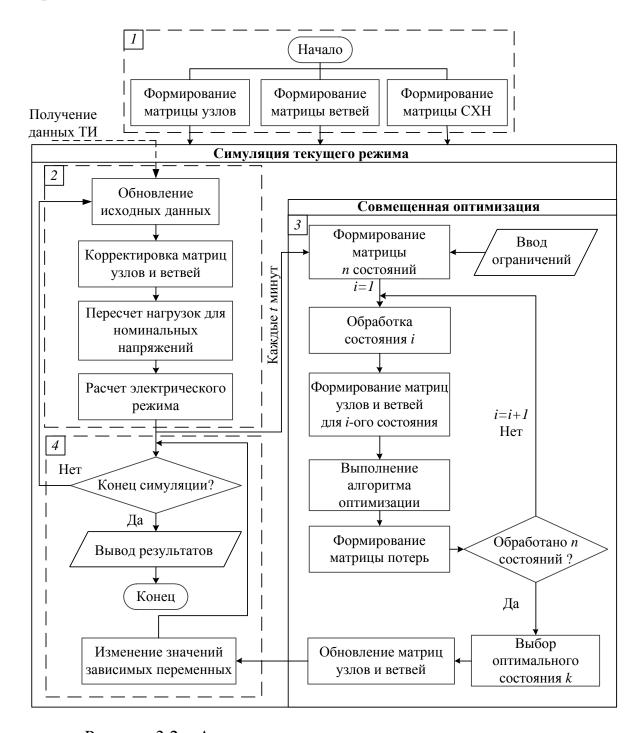


Рисунок 3.2 – Алгоритм оптимизации уровня напряжения в СЭС угольной шахты

Предложенный алгоритм включает в себя выполнение следующих блоков:

*Блок 1 – подготовка исходных данных*. В нем выполняется сбор данных о топологии электрической сети (матрицы узлов, ветвей) и формируется матрица статических характеристик нагрузки по напряжению.

Блок 2 — обновление исходных данных и расчет текущего режима. Выполняется сбор данных телеизмерений и корректировка исходных данных. По полученным данным выполняется определение нагрузок для номинального уровня напряжения и обновляются матрицы узлов и ветвей. Далее выполняется расчет текущего режима функционирования СЭС.

*Блок 3 — Совмещенная оптимизация*. В нем с определенной периодичностью осуществляется определение значений зависимых переменных для получения минимума целевой функции (3.1).

Принцип предлагаемого алгоритма оптимизации состоит в совместном рассмотрении дискретных и недискретных переменных.

На *первом этапе* оптимизации выполняется формирование матрицы состояний СЭС угольной шахты. Составляемая матрица состояний позволяет получить математическое представление о возможных состояниях СЭС угольной шахты, т.е. отображает совокупность всех возможных состояний системы в текущий момент времени.

Второй этап состоит в распознавании матрицы состояний и выполнении оптимизации недискретных параметров. На каждом этапе поиска целевой функции, выполняется обращение к матрице состояний СЭС.

После выполнения оптимизации недискретных переменных выбирается состояние СЭС с наименьшим значением потерь активной мощности и выполняется корректировка матриц узлов и ветвей.

Блок 4 — Блок формирования управляющих сигналов на изменение значений зависимых переменных. В нем формируются управляющие сигналы на изменение значений зависимых переменных и оптимальные уровни напряжения в узлах сети, а также оптимальное значение напряжения на шинах ГПП. Затем операция оптимизации зависимых переменных повторяется с заданной периодичностью. Периодичность выполнения

оптимизации зависимых параметров определяется коммутационным ресурсом и алгоритмом работы устройства РПН на ГПП.

#### 3.2.1. Подготовка исходных данных

Для выполнения расчета электрических режимов необходимо подготовить исходные данные. Исходные данные должны включать в себя сведения о топологии электрической сети, информацию о нагрузке узлов СЭС угольной шахты, а также информацию о значениях зависимых переменных. Данные о топологии электрической сети, информация о нагрузке узлов, а также информация о значениях зависимых переменных представляются в виде двух матриц: матрица ветвей и матрица узлов.

Каждая из матриц создается по аналогии: каждая строчка представляет собой узел или ветвь схему, а каждый столбец — соответствующие параметры.

Для узлов матрица содержит следующие параметры:

- 1. Номер узла;
- 2. Название узла;
- 3. Тип узла(базисный узел, узел генерации, узел нагрузки);
- 4. Номинальное напряжение (кВ);
- 5. Активная проводимость шунта (мкСм);
- 6. Реактивная проводимость шунта (мкСм);
- 7. Тип статических характеристик нагрузки по напряжению;
- 8. Потребляемая активная мощность для узла нагрузки (кВт);
- 9. Потребляемая реактивная мощность для узла нагрузки (кВАр);
- 10. Генерируемая активная мощность для генераторного узла (кВт);
- 11. Генерируемая активная мощность для генераторного узла(кВАр);
- 12. Максимальная реактивная мощность, выдаваемая генераторным узлом (кВАр);

- 13. Максимальная реактивная мощность, потребляемая генераторным узлом (кВАр);
  - 14. Заданный модуль напряжения (кВ);

Матрица ветвей содержит в каждом столбце следующие данные:

- 1. Номер ветви;
- 2. Номер узла начала;
- 3. Номер узла конца;
- 4. Тип ветви;
- 5. Название;
- 6. Активное сопротивление (Ом);
- 7. Индуктивное сопротивление (Ом);
- 8. Активная проводимость ветви (мкСм);
- 9. Реактивная проводимость шунта (мкСм);
- 10. Номер анцапфы трансформатора;
- 11. Тип УРПН;
- 12. Коэффициент трансформации.

Затем составляется матрица смежности, которая содержит в себе информацию о топологии сети. В этой матрице число столбцов и число строчек равно числу узлов в сети. Если два узла связаны между собой, то в соответствующем пересечении столбцов и строк ставится 1. Если же эти узлы электрически не связаны, то ставится 0. Подобная матрица может использоваться для эквивалентирования сети с целью сокращения времени расчетов. Полученная матрица является математическим описанием топологии электрической сети шахты. Матричный способ задания исходных данных является наиболее удобным и эффективным для последующего расчета и оптимизации электрического режима [67].

Также формируются данные о статических характеристиках нагрузки электроприемников шахты по напряжению, которые могут быть определены как расчетным, так и экспериментальным путем.

Матрица статических характеристик нагрузки по напряжению (СХН) содержит в каждом столбце следующие данные:

- 1. Тип СХН;
- 2. Минимальное напряжение для заданной СХН (кВ);
- 3. Постоянный коэффициент по активной мощности;
- 4. Линейный коэффициент по активной мощности;
- 5. Квадратичный коэффициент по активной мощности (задается только для ПУПП, питающих группу электроприемников, не имеющих устройств телеизмерений);
  - 6. Постоянный коэффициент по реактивной мощности;
  - 7. Линейный коэффициент по реактивной мощности;
- 8. Квадратичный коэффициент по реактивной мощности (задается только для ПУПП, питающих группу электроприемников, не имеющих устройств телеизмерений).

Исходя из матрицы узлов и ветвей, создается матрица узловых проводимостей, которая в дальнейшем является исходной для выполнения расчета электрических режимов. Процесс формирования матриц узловых проводимостей описан в Приложении 2.

Данные о нагрузках и генерации преобразуются в отдельные матрицы, которые используются при выполнении расчета электрических режимов.

Полученные матрицы используются для формирования нелинейных уравнений установившегося режима (УУР).

### 3.2.2. Выбор метода расчета установившегося режима работы СЭС угольной шахты

Существует большое количество численных методов, с помощью которых могут быть обработаны нелинейные УУР для получения данных о модулях и фазах напряжения в узлах. Точных методов для решения этих

уравнений не существует. Методы решения нелинейных УУР подробно рассмотрены в работах [65-87].

Методы решения нелинейных УУР можно классифицировать следующим образом:

- I. Традиционные методы [65-80]
  - 1. Метод покоординатного спуска (градиентный метод).
  - 2. Методы Зейделевского типа (методы Зейделя и Гаусса-Зейделя).
  - 3. Метод узловых напряжений.
  - 4. Методы Ньютоновского типа.
    - 4.1. Классический метод Ньютона.
    - 4.2. Методы по параметру.
- 4.3. Методы с изменением точки линеаризации по ходу формирования матрицы Якоби и ее треугольного разложения (методы К.М. Брауна, Н.И. Бартоломея).
  - II. Нетрадиционные методы [81-87]
    - 1. Метод нечеткой логики
    - 2. Метод на базе искусственных нейронных сетей
    - 3. Прочие методы (на базе генетических алгоритмов и др.)
- В [66] рассмотрено применение ДЛЯ решения УУР метода наискорейшего спуска. Для анализа использовались УУР в форме балансов токов в декартовых координатах. Проведена оценка скорости сходимости этого метода в рамках сети 110 кВ (7 узлов). Для выполнения расчета режимов такой схемы потребовалось 3220 итераций. При этом показано, что скорость сходимости метода наискорейшего спуска принципиально не изменится, если УУР будут записаны в любой другой форме и полярных координатах. Также в [66] выполнялось изменение других параметров схемы замещения: количество узлов, класс напряжений, степень неоднородности пассивных параметров, величины нагрузок и др., но улучшения сходимости при этом не наблюдалось.

Решение УУР методами зейделевского типа подробно рассмотрено в работах [66-68, 74, 78-79]. Итерационная схема метода Зейделя проста, но может сходиться медленно или расходиться. Тем не менее, методы зейделевского типа обладают лучшей сходимостью и часто применяются для определения начальных приближений при решении нелинейных УУР методами ньютоновского типа. Кроме того, методы зейделевского типа предъявляют минимальные требования к памяти ЭВМ т.к. при их использовании нет нужды в хранении матриц большого размера. Также стоит отметить получивший на начальных этапах применения ЭВМ для решения УУР метод Гаусса-Зейделя. В нем для улучшения сходимости процесса итераций вводится специальный ускоряющий коэффициент. Однако, несмотря на введение коэффициентов ускорения, метод Зейделя – Гаусса не намного лучше метода Зейделя [74, с. 147].

В [66-67, 80] рассмотрено применение метода узловых потенциалов для решения нелинейных УУР. Основным преимуществом этого метода является то, что число итераций не зависит от числа переменных. Метод заключается последовательном уточнении значений узловых напряжений путем решения системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Для улучшения сходимости метода узловых потенциалов итерационный процесс может регулироваться путем умножения поправки по напряжению на коэффициент демпфирования. Метод определенный получил предварительных вычислений распространение ДЛЯ выполнения потокораспределения в сетях с классом напряжения 110 кВ и выше.

Методы ньютоновского типа включают в себе классический метод Ньютона и его модификации, связанные с введением коэффициента ускорения – параметра (метод «по параметру»). В настоящее время методы ньютоновского типа широко применяются для реализации программных комплексов для расчета режимов [80]. Классический метод Ньютона подробно описан в работах [65-67,69-71,80]. Различные вариации метода «по параметру» описаны в работах [68, 72-76]. Классический метод Ньютона

чувствителен к выбору начальных приближений, если начальные приближения далеки от искомого решения, то классический метод Ньютона может сходиться медленно или не сходиться вообще. В случае монотонности функции метод обеспечивает получение решения с любого приближения. Если функция немонотонная, то получение решения существенно зависит от начального приближения. Метод может пропустить правильное решение и выйти к другому решению, или вообще разойтись.

Все методы ньютоновского типа заключаются в формировании матрицы Якоби и последующим определением поправок к искомым переменным. Формирование матрицы Якоби производится на каждой итерации до момента, когда точность расчетов достигнет заданной. В [81] отмечается, что решение системы УУР метод Ньютона имеет более высокую надежность с точки зрения сходимости по сравнению с методами Зейделевского типа. Методы Ньютоновского типа позволяют получить решение, когда градиентный метод и методы Зейделевского типа расходятся при решении УУР.

Сущность классического метода Ньютона заключается в определении на каждой итерации вектора поправок  $\Delta X^{(k+1)}$  и в прибавлении его к вектору независимых переменных  $X^{(k)}$ . Итерационный процесс при этом имеет вид:

$$X^{(k+1)} = X^{(k)} + \Delta X^{(k+1)} \tag{3.2}$$

Классический метод Ньютона обладает плохой сходимостью в системах УУР с плохо обусловленной матрицей Якоби или при плохих начальных приближениях. Поэтому классический метод Ньютона не пригоден для анализа предельных режимов, а также анализа нормальных режимов близких к предельным режимам. В таком случае рекомендуется применять метод Ньютона «по параметру».

В отличие классического метода Ньютона, методы по параметру предусматривают расчет переменных на каждой итерации k по следующей формуле:

$$X^{(k+1)} = X^{(k)} + \lambda^{(k)} \cdot \Delta X^{(k+1)}$$
(3.3)

где  $\lambda^{(k)}$  - коэффициент демпфирования или коэффициент корректировки длины шага, определяемый на каждой итерации.

Цель введения параметра  $\lambda^{(k)}$  состоит в предупреждении расходимости процесса итераций. Сходимость метода Ньютона можно оценить по изменению различных норм вектора небалансов $||W_{h\delta}||$ . Монотонное снижение любой из этих норм в процессе итераций является достаточным условием сходимости процесса.

Одним ИЗ первых ПО параметру, называемый метод метод последовательных интервалов, был предложен Л. А. Круммом [78, с. 85]. Этот метод фактически соответствует утяжелению режима и решению на каждом шаге утяжеления уравнений УР. Здесь величина параметра определяется длиной выбираемых интервалов, которые выбираются случайным образом. Таким образом, скорость сходимости простейшего метода по параметру зависит от длины выбираемых интервалов.

В настоящее время в программах для расчета электрических режимов наибольшее распространение получило вычисление коэффициента демпфирования по схеме Энеева-Матвеева [72]. Такая схема обладает высокой надежностью и окупает дополнительные затраты времени по сравнению с классическим методом Ньютона. Дополнительные затраты вызваны необходимостью определения коэффициента демпфирования и увеличением числа итераций вследствие ограничения шага. В частности, такая схема применяется в ПВК для расчета и анализа установившихся и переходных электромеханических режимов энергосистем MUSTANG [77].

В методе Брауна [79] предложено выполнять линеаризацию каждого отдельного уравнения по мере выполнения процедуры исключения Гаусса. Метод Брауна является особо надежным, специально ориентированным на решение задач с плохо обусловленной матрицей Якоби. Метод П.И. Бартоломея также заключается в изменении точки линеаризации от одного уравнения к другому [87]. Тем не менее, у вышеуказанных методов нет явных преимуществ перед методами ньютоновского типа.

Также стоит выделить нетрадиционные методы решения УУР, подробный анализ которых выполнен в работе [82].

В целом нетрадиционные методы решения УУР показали себя достаточно хорошо, в частности, в некоторых работах [83-86] было достигнуто сокращение времени решения УУР по сравнению с традиционными методами.

Тем не менее, по причине отсутствия свидетельств подтверждающих явные преимущества нетрадиционных методов решения УУР над традиционными методами, возможность их применения в рамках СЭС угольной шахты не будет рассматриваться.

В таблице 3.1 приведен сравнительный анализ традиционных методов решения нелинейных УУР.

Проведенный анализ показывает, что наиболее эффективным среди рассмотренных методов является метод Ньютона с расчетом коэффициента демпфирования по схеме Энеева-Матвеева. Указанный метод отвечает требуемым требованиям по точности, а также обладает хорошей сходимостью в СЭС любой конфигурации.

Однако этот метод имеет определенную сложность в процессе реализации, что связано с необходимостью формирования матриц двойных производных (матриц Гессе). Тем не менее, современные программные средства позволяют эффективно реализовать вышеуказанный метод на ЭВМ.

100 Таблица 3.1 - Сравнение традиционных методов решения нелинейных УУР

Методы решения	Метод наискорейшего спуска (градиентный метод)	Методы зейделевского типа	Метод узловых потенциалов	Классический метод Ньютона	Метод Ньютона с вычислением $\lambda^{(k)}$ по схеме Энеева - Матвеева	Метод Ньютона, основанный на изменении точки линеаризации
Достоинства	- простота реализации - не чувствителен к выбору плохих начальных приближений и к встрече с дискриминантой; объем вычислений на каждой итерации сравнительно мал.	- простота реализации, требуют мало памяти ЭВМ - обладают лучшей сходимостью, чем метод наискорейшего спуска	число итераций для получения решения не зависит от числа переменных высокая надежность малый объем вычислений и времени расчета режима.	- высокая сходимость из хорошего начального приближения при условии, что матрица Якоби не вырождена	- высокая надежность - возможность решения УУР в СЭС любой конфигурации	- высокая надежность
Недостатки	- недопустимо медленная сходимость - низкая надежность	- медленная сходимость, зависящая от сложности расчетной схемы	сложность учета узлов $P$ - $U$ типа	- зависимость сходимости метода от начальных приближений - отсутствие глобальной сходимости в СЭС любой конфигурации	- необходимость вычисления коэффициента демпфирования на каждой итерации	- не имеет явных преимуществ перед методами Ньютоновского типа

Таким образом, в рамках алгоритма оптимального регулирования напряжения будет рассматриваться метод Ньютона с расчетом коэффициента демпфирования по схеме Энеева - Матвеева. Подробное описание данного метода представлено в Приложении 3.

### 3.2.3. Описание зависимых переменных, изменяемых в процессе оптимизации

После выполнения симуляции текущего режима, выполняется оптимизация режима работы СЭС угольной шахты. Для ускорения процесса оптимизации предлагается отдельно рассматривать дискретные и недискретные зависимые переменные.

Виды зависимых переменных, которые могут изменяться для получения искомого оптимального режима, представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Виды зависимых переменных, регулируемых в процессе оптимизации режима работы СЭС

Наименование	Обознач	Тип	Примечание		
переменной	ение				
Реактивная	$Q_{{ m cm}j}$	Недискре	Для каждой синхронной машины в СЭС		
мощность, тная		тная	угольной шахты определена величина $Q_{\mathrm{CM}j}$		
выдаваемая или			входящая в интервал $[Q_{\mathrm{CM.мин}}, Q_{\mathrm{CM.макс}}].$		
потребляемая			Верхняя и нижняя граница определяется		
синхронными	нхронными		особенностями каждой синхронной		
машинами			машины.		
Номер ступени	$n_{\scriptscriptstyle  m T}$	Дискретн	Для каждого трансформатора определено		
регулирования		ая	дискретное значение переменной $n_{\rm i}$ ,		
УРПН			находящейся в пределах $n_{\rm T} = [n_{\rm T.MИH}, n_{\rm T.MAKC}]$ .		
Номер ступени	$n_{\mathrm{ECK}}$	Дискретн	Каждая БСК имеет определенное		
БСК		ая	количество ступеней. При этом мощность		
			БСК равна дискретной величине из ряда		
			$n_{BCK} = [n_{BCK,Muh}, n_{BCK,Makc}].$		

Принцип предлагаемого алгоритма совмещенной оптимизации состоит в раздельном рассмотрении дискретных и недискретных переменных. Сначала в виде матрицы составляется перечень всех дискретных состояний

исследуемой СЭС угольной шахты. Составляемая матрица состояний позволяет получить математическое представление о возможных состояниях СЭС угольной шахты, т.е. отображает совокупность всех возможных состояний системы в текущий момент времени.

Каждая строка матрицы представляет собой возможное состояние а каждый столбец число возможных вариаций отдельной переменной. Число колонок в матрице соответствует числу дискретных регуляторов напряжения, а число строчек соответствует возможному числу состояний системы. Число возможных состояний СЭС дискретных промышленного предприятия напрямую зависит от числа дискретных регуляторов уровня напряжения. Число возможных состояний очень важно т.к. оно напрямую влияет на скорость вычислений. Например, если на ГПП угольной шахты установлены два силовых трансформатора с числом положений РПН 19, а на шинах ГПП установлены два устройства БСК с тремя ступенями регулирования, то число возможных состояний системы составит  $172 \cdot 3^2 = 2601$ . Условно принимая, что время оптимизации целевой функции для недискретных переменных составит 1 секунду, необходимое для анализа всех возможных состояний СЭС промышленного предприятия может занять длительный промежуток времени. Следовательно, необходимо уменьшить количество возможных комбинаций.

Для обеспечения снижения уровня токов короткого замыкания и исключения уравнительных перетоков трансформаторы ГПП угольной шахты работают на отдельные секции шин. В связи с этим, одним из способов снижения возможного числа комбинация является раздельное рассмотрение сетей питаемых от каждого трансформатора. Данный способ является вполне приемлемым т.к. в нормальном режиме сети, запитанные от каждого трансформатора можно считать независимыми. Таким образом, при рассмотрении радиальных сетей становится возможным уменьшить число возможных комбинаций дискретных переменных.

Второй способ заключается в том, что устройство РПН трансформатора не может сразу перейти из текущего состояния в крайнее. Другими словами РΠН анцапфы устройство переключает последовательно. Время переключения составляет от 3 до 10 секунд. При этом независимо от переключения устройства РΠН длительности имеют блокировку, разрешающую переход избирателя только на одну ступень. Следовательно, рассматривать матрицу состояний с числом возможных положений РПН более 3 не имеет смысла. Таким образом, рассматриваются три положения РПН:  $n_{\text{тек}}$ ,  $n_{\text{тек}}$ +1,  $n_{\text{тек}}$ -1. Принимая во внимание две вышеуказанные гипотезы, число возможных комбинаций снижается до  $3^1 \cdot 3 = 9$ .

#### 3.2.4. Формирование матрицы состояний сети

Матрица состояний содержит в себе все возможные дискретные состояния сети в данный момент времени с учетом всех возможных значений дискретных переменных. Каждый столбец представляет собой дискретную переменную, а каждая строка одно из возможных состояний СЭС. Для каждого из этих состояний выполняется оптимизация недискретных переменных. Чтобы быть уверенным в том, что все возможные состояния включены в матрицу состояния, матрица конструируется по аналогии с таблицей истинности, используемой в булевой алгебре. Основная задача состоит в последовательном перечислении всех возможных состояний.

Предположим, что есть три переменные  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  значения которых варьируются в следующих пределах  $\{-1,0,1\}$ ,  $\{0,1\}$ ,  $\{0,1\}$ . В таком случае число возможных состояний системы равно  $2 \cdot 2 \cdot 3 = 12$ . Создание матрицы начинается с последнего столбца в которой размещаются все возможные значения переменной  $x_1$ . В следующем столбце указываются все возможные значения переменной  $x_2$ . Чередование переменных  $x_2$  и  $x_3$  начинается когда полностью заполнен столбец с переменной  $x_1$ . В конечном итоге будет получена следующая матрица:

( №cocm	Дискр.перемен.№1	Дискр.перемен.№2	Дискр.перемен.№3	
1	0	0	-1	
2	0	0	0	
3	0	0	1	
4	0	1	-1	
5	0	1	0	
6	0	1	1	(2.4)
7	1	0	-1	(3.4)
8	1	0	0	
9	1	0	1	
10	1	1	-1	
11	1	1	0	
12	1	1	1	

Как только матрица состояний сети сформирована, следующий этап состоит в распознавании матрицы сети и выполнении оптимизации недискретных параметров. После получения результатов оптимизации и выбора наиболее оптимального режима, рекомендуемые значения дискретных и недискретных переменных отправляются на соответствующие регуляторы напряжения.

Матрица состояний является источником данных для последующего выполнения оптимизации недискретных параметров. На каждом этапе поиска целевой функции выполняется обращение к матрице состояний СЭС.

Следующим этапом оптимизации является оптимизация недискретных переменных для каждого из возможных состояний СЭС промышленного предприятия. Оптимизируемой переменной является величина реактивной мощности, потребляемая (генерируемая) синхронными машинами. После выполнения оптимизации каждого из дискретных состояний системы, выбирается то состояние, в котором значение потерь активной мощности в СЭС угольной шахты минимально.

#### 3.2.5. Оптимизация значений недискретных переменных

Существует множество методов нелинейной условной оптимизации. Однако в настоящее время для решения задачи нелинейной условной оптимизации целесообразно рассматривать метод последовательного квадратичного программирования (SQP) и метод внутренней точки. Эти методы согласно [88, 89] являются наиболее совершенными для такого рода задач. Предлагается в рамках практической реализации предложенного алгоритма рассмотреть эти методы оптимизации и сравнить их по двум показателям:

- 1. Эффективность алгоритма оптимизации, которая оценивается величиной снижения потерь активной электроэнергии в СЭС  $\Delta W_{\Delta}$  (кВт·ч).
- 2. Скорость выполнения алгоритма (с). Процесс оптимизации должен осуществляться в режиме реального времени с заданной периодичностью. Поэтому для исключения принятия решений с запозданием важно, чтобы реализация алгоритма была максимально быстрой.

### 3.2.5.1. Метод последовательного квадратичного программирования

Метод последовательного квадратичного программирования (SQP) является одним из наиболее современных методов нелинейной оптимизации [88, 89]. В статье Schittkowski К. [90] были успешно реализованы тестовые расчеты с использованием данного алгоритма. В результате было получено превосходство метода SQP по сравнению с другими методами оптимизации в части эффективности, точности и процента успешного решения тестовых оптимизационных задач.

Метод SQP основан на работах Biggs M.C. [91], Han S.P. [92] и Powell M.J.D.[93-94]. Он позволяет использовать метод Ньютона для оптимизации при наличии ограничений, как это сделано для оптимизации без ограничений. На каждой основной итерации осуществляется аппроксимация

Гессиана для функций Лагранжа при помощи квазиньютоновского модифицированного метода. Такой подход необходим для формирования подзадачи квадратичного программирования, решение которой используется для определения направления поиска в процедуре линейного поиска. Обзор методов последовательного квадратичного программирования представлен в работах Fletcher R. [95], Gill P.E. [96], Powell M.J.D. [94] и Schittkowski K. [90]. Подробное описание метода SQP приводится в [88, 89].

Целевую функцию в рамках задачи нелинейной оптимизации можно сформулировать следующим образом:

$$\min_{x \in R^n} f(x),$$

$$h_{R^n \to R^m}(x) = 0,$$

$$g_{R^n \to R^p}(x) \le 0$$
(3.5)

где  $f: R^n \to R^n$  – целевая функция,  $h: R^n \to R^m$  – функция задания ограничений в виде равенства,  $g: R^n \to R^p$  – функция задания ограничений целевой функции в виде неравенств.

Принцип последовательного квадратичного программирования заключается в поиске минимума целевой функции путем итеративного решения подзадачи квадратичного программирования. Для итерации k, соответствующей вектору  $x_k$ ,  $k \in \mathbb{N}^*$ , решение подзадачи квадратичного программирования позволяет найти новое решение, которое формирует новый вектор  $x_{k+1}$  и провести новую итерацию. Процесс повторяется пока последовательность  $(x_k)_k \in \mathbb{N}^*$  не начнет двигаться в направлении локального минимума  $x^*$  целевой функции, когда  $k \to \infty$ . На практике процесс заканчивается, когда разница между векторами  $x_{k+1}$  и  $x_k$  меньше заданного параметра  $\varepsilon$ . Параметр  $\varepsilon$  определяет скорость сходимости.

Функция  $L: R^{n \times m \times p} \longrightarrow R^p$  имеет следующий вид:

$$L(x,\lambda,\mu) = f(x) + \lambda^T h(x) + \mu^T g(x), \tag{3.6}$$

Такая функция называется функцией множителей Лагранжа. Вектора  $\lambda \in R^m$  и  $\mu \in R^{+p}$  называются множителями Лагранжа.

Для функции  $f: \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}$ , называется градиентом f при  $x \in \mathbb{R}^n$ , оператор  $\nabla f(x)$ :

$$\nabla f(x) = \left(\frac{\partial f(x)}{\partial x_1}, \frac{\partial f(x)}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial f(x)}{\partial x_n}\right)^T,$$
(3.7)

Таким же образом формируется матрица Гессе функции f при  $x \in \mathbb{R}^n$ , оператор Hf(x), представляющий вторые производные:

$$\left(Hf(x)\right)_{ij} = \frac{\partial^2 f(x)}{dx_i \partial x_j},\tag{3.8}$$

Для функции h:  $R^n \to R^m$  символ  $\nabla$  называется якобианом функции h:

$$\nabla h(x) = (\nabla h_1(x), \nabla h_2(x), \dots, \nabla h_m(x)). \tag{3.9}$$

Формирование подзадачи квадратичного программирования выполняется таким образом, чтобы полученное выражение наиболее точно характеризовало задачу нелинейной оптимизации в направлении вектора  $x_k$ . В целом выполняются следующие операции:

- целевая функция f заменяется аппроксимированной квадратичной локальной функцией:

$$f(x) \approx f(x_k) + \nabla f(x_k)(x - x_k) + \frac{1}{2}(x - x_k)^T H f(x_k)(x - x_k), \tag{3.10}$$

- функции задания ограничений h и g в виде их локальной аппроксимации

$$h(x) \approx h(x_k) + \nabla h(x_k)(x - x_k),$$
  

$$g(x) \approx g(x_k) + \nabla g(x_k)(x - x_k).$$
(3.11)

Заменив выражения:

$$d(x) = x - x_k,$$
  
$$B_k = Hf(x_k).$$

Подзадача квадратичной информации тогда будет записана в следующей форме:

$$\min_{d(x) \in \mathbb{R}^n} \nabla f(x_k)^T d(x) + \frac{1}{2} d(x)^T B_k d(x), \tag{3.12}$$

При ограничениях

$$h(x_k) + \nabla h(x_k)^T d(x) = 0, g(x_k) + \nabla g(x_k)^T d(x) \le 0.$$
 (3.13)

Для каждой итерации процесс последовательного квадратичного программирования можно разделить на 3 этапа:

- 1. Корректировка матрицы Гессе для Лагранжевой функции. Определение значения вектора  $B_k$  являющего аппроксимацией матрицы Гессе множителя Лагранжа функции f. Этот этап выполняется с использованием квазиньютоновского метода BFGS (Алгоритм Бройдена Флетчера Гольдфарба Шанно).
- 2. Решение подзадачи квадратичного программирования. Второй этап состоит в решении подзадачи квадратичного программирования (3.12). Для ее решения существует несколько методов. Этот этап подразделяется на две фазы. Первая фаза заключается в расчете наиболее вероятной точки. Вторая фаза заключается В генерации определенной итеративной последовательности наиболее вероятных точек, которая сходится к искомому решению. В таком методе утверждается, что активный набор,  $\overline{A}_k$  является некой оценкой активных ограничений (т.е. то, что представляет собой ограничительные пределы) в данной точке решения. Фактически все алгоритмы квадратичного программирования являются методами активных наборов. В связи с этим, существует множество различных методов, которые очень схожи по своей сути, но имеют разное представление.
- 3. Вычисление линейного поиска и функции выгоды. Третий этап состоит в поиске коэффициента демпфирования  $\alpha_k$ , который позволяет замедлить рост значения функции и предотвратить расхождение алгоритма. По итогам второго этапа получается вектор  $d_k$  используемый для формирования нового вектора  $x_{k+1} = x_k + \alpha_k d_k$ .

$$x_{k+1} = x_k + \alpha_k d_k, \tag{3.14}$$

При решении задачи оптимизации с ограничениями, функция  $\Phi: R^n \to R$  является точной, если каждый локальный минимум  $x^*$  совпадает с минимумом функции  $\Phi$  без ограничений. Эта функция позволяет определить прогресс алгоритма оптимизации. Возможная форма функции имеет следующий вид:

$$\Phi(x,\mu) = f(x) + \mu \|c(x)\|, \tag{3.15}$$

Где оператор  $\| \|$ обозначает норму вектора, а  $\mu$  является штрафным коэффициентом.

Шаг  $a_k d_k$  будет принят, если следующее выражение будет истинно:

$$\Phi(\mathbf{x}_k + \alpha_k d_k, \mu_k) \le \Phi(\mathbf{x}_k, \mu_k) + \eta \alpha_k D(\Phi(\mathbf{x}_k, \mu), \mathbf{d}_k), \ \eta \in (0, 1),$$
 (3.16)

где  $D(\Phi(\mathbf{x}_k,\mu),\mathbf{d}_k)$  является производной  $\Phi$  по направлению вектора  $d_k$ . Выражение (3.16) верифицируется для штрафного коэффициента  $\mu$ , имеющего достаточно большое значение.

По итогам трех этапов итеративный процесс повторяется до тех пор, пока не будут выполнены условия сходимости.

Метод последовательного квадратичного программирования доступен в библиотеке Optimization Toolbox в программной среде MATLAB.

### 3.2.5.2. Метод внутренней точки

Метод внутренней точки (Interior point) наряду с методом SQP является наиболее эффективным методом нелинейной оптимизации для широкого диапазона задач. Этот метод также известен как метод барьерных функций [99]. Первый метод внутренней точки был опубликован в 1967 году И.И. Дикиным [88]. Их название связано с тем, что, в отличие от симплекс-метода, перебирающего угловые точки многогранника допустимых решений, вычислительный процесс в методах внутренних точек происходит в относительной внутренности допустимого множества. Подробное описание

метода внутренней точки в общем виде приведено в [88]. Метод внутренней точки также доступен в программной среде MATLAB.

# 3.3. Разработка алгоритмического обеспечения блока автоматического регулирования УРПН

# 3.3.1. Задачи регулирования при использовании блока автоматического регулирования

Для успешного выполнения оптимального регулирования напряжения с использованием блока автоматического регулирования УРПН необходимо создание системы управления, алгоритма управления и выбор уставок срабатывания УРПН.

Выбор нижней уставки срабатывания УРПН определяет устойчивую работу электродвигателей и важен для СЭС угольных шахт, по причине удаленности электроприемников от центра питания и тяжелых условий работы и пуска электродвигателей. Минимум регулировочных характеристик нагрузки по напряжению может иметь разные значения в зависимости от режима работы СЭС угольной шахты и состава нагрузки. Таким образом, нижний предел регулирования является плавающим. При моделировании режима работы СЭС угольной шахты нижний предел регулирования определяется расчетным способом, исходя из текущего режима работы угольной шахты. Фактически расчет представляет собой определение линии с наибольшими потерями и расчет нижней уставки РПН по формуле [5,6]:

$$U_{\text{VCT.H}} = U_{\text{min,gon}} + MAX \left\{ I_{\text{HT},i} \left( R_{\pi i} \cos \varphi_i + X_{\pi i} \sin \varphi_i \right) \right\}; \tag{3.17}$$

где:  $I_{\text{нг}.i}$  - ток нагрузки i-той линии в часы максимума нагрузки;  $R_{\text{л}i}$  и  $X_{\text{л}i}$  - соответственно активное и реактивное сопротивление i-ой линии.

При регулировании напряжения на ГПП необходимо обеспечить баланс между снижением суточного числа переключений (зависящего от ширины зоны нечувствительности), увеличением срока службы УРПН до

нескольких лет и достижением экономического эффекта от процесса регулирования напряжения [5,6].

Широкая зона нечувствительности является причиной повышенного потребления электроэнергии при работе на повышенном напряжении [5,6].

Проблему нахождения верхней уставки срабатывания устройств РПН, при которой процесс регулирования будет экономически выгодным, можно решить, построив целевую функцию экономической эффективности регулирования напряжения на шинах понизительной подстанции в зависимости от ширины зоны нечувствительности  $Z=f(\Delta U)$ .

$$Z = \mathcal{G}_{c} - C_{\text{nep}} - C_{\text{nocr}} - K_{\text{rog}}, \tag{3.18}$$

где:  $Э_{\Gamma}$  - годовая экономия от снижения потерь активной электроэнергии при внедрении автоматического регулирования режима напряжения на шинах понизительной подстанции;  $C_{\text{пер}}$  - годовые текущие затраты зависящие от ширины зоны нечувствительности;  $C_{\text{пост}}$  - годовые текущие затраты не зависящие от ширины зоны нечувствительности;  $K_{\text{год}}$  - капитальные затраты на аппаратуру автоматического управления устройствам РПН, приведенные к одному году [5].

Определив нижнюю уставку срабатывания РПН и задаваясь различными значениями ширины зоны нечувствительности  $\Delta U$  можно найти область значений верхней уставки, при которой регулирование режима напряжения с помощью устройства РПН силового трансформатора экономически выгодно.

Входными параметрами для разработки структуры алгоритма работы устройства БАР РПН в соответствии с ГОСТ 32144-2013 являются:

 $U_{\text{доп+}}$ ,  $U_{\text{доп-}}$  - границы допустимых отклонений напряжения от номинального. Указанные границы не подвергаются изменению в течение работы устройства на конкретном объекте.

 $U_{\rm pau}$  - поддерживаемое РПН напряжение, определенное с использованием алгоритма оптимизации уровня напряжения;

 $\Delta U$  - зона нечувствительности работы БАР РПН;

- T1— задержка времени выдачи первичной команды на управление приводом, c;
- T2 задержки времени выдачи повторной команды на управление приводом в том же направлении, c;
- T3— задержки времени выдачи очередной команды на управление приводом при отработке перенапряжения, с.

Графическое отображение входных величин алгоритма работы РПН показано на рисунке 3.3.

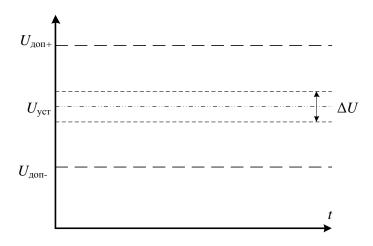


Рисунок 3.3 – Графическое отображение входных величин алгоритма работы

### 3.3.2. Алгоритм регулирования напряжения

При создании алгоритма регулирования устройством БАР РПН необходимо учитывать следующие факторы:

- при регулировании напряжения необходимо поддерживать его значение у потребителя в пределах, нормируемых ГОСТ 32144-2013;
- необходимо, чтобы УРПН не реагировало на кратковременные снижения напряжения, обусловленные короткими замыканиями, резкими изменениями нагрузки, работой релейной защиты и т.д;
- при регулировании напряжения необходимо, чтобы учитывались оптимальные значения напряжения, полученные по алгоритму п. 3.2;

– кроме того, необходимо, чтобы количество переключений контроллера было наименьшим. Это требование вытекает из обеспечения надёжности функционирования УРПН, поскольку с ростом частоты переключений возрастает риск отказа оборудования.

При формировании алгоритма работы БАР РПН за основу принят алгоритм работы устройства «Сириус-2-РН» [100].

Предлагаемый алгоритм работы блока автоматического регулирования РПН включает выполнение следующих операций:

- 1. При включении питания происходит тестирование работоспособности регулятора. При успешном прохождении тестов включается реле «Отказ», нормально замкнутые контакты размыкаются, сигнал «Отказ» снимается.
- 2. Циклически считываются данные с АЦП, осуществляется цифровая фильтрация сигналов, вычисляются действующие значения токов и напряжений, а также на основе взаимного расположения векторов напряжения рассчитываются (при необходимости) напряжения обратной последовательности  $U_2$  для каждой секции.
- 3. Запускается выполнение алгоритма определения оптимального уровня напряжения в СЭС. Выполняется считывание информации о СЭС и электроприемниках, а также начинают собираться данные телеизмерений.
- 4. Наличие сигнала внешней блокировки («Внеш. блокировка 1, 2»,) запрещает формирование команд «Прибавить» и «Убавить», включается светодиод «Блокировка по внешнему входу» на передней панели устройства. При снятии сигналов внешней блокировки гаснет светодиод блокировки, разрешается регулирование. Аналогично работают и два универсальных дискретных входа, если они запрограммированы как входы блокировки.

При обнаружении сигнала от нижнего концевого выключателя (на входе «Запрет убавить») запрещается выдача команды «Убавить», включается светодиод «Нижнее положение». При снятии сигнала от концевого выключателя светодиод гаснет.

При обнаружении сигнала от верхнего концевого выключателя (на входе «Запрет прибавить») запрещается выдача команды «Прибавить», включается светодиод «Верхнее положение». При снятии сигнала от концевого выключателя светодиод гаснет.

При одновременном наличии сигналов на дискретных входах «Запрет прибавить» и «Запрет убавить» регулировка напряжения полностью запрещается, горят оба светодиода крайних положений, включаются реле «Отказ ПМ» и «Сигнализация», на индикатор выводится сообщение: «ПМ неисправен». Устройство деблокируется, когда будет снят хотя бы один из сигналов.

При отсутствии сигнала на входе «Ручн./Автомат» устройство находится в режим внешнего ручного регулирования, при этом включен светодиод «Ручное управление».

5. Фактические значения напряжений и токов сравниваются с уставками БАР.

Если на регулируемой секции ток ввода  $I_{BB} > I_{BBmax}$ , то запрещается выдача команды «Прибавить», включается светодиод «Перегрузка», через 10 секунд включается реле «Перегрузка». Светодиод и реле «Перегрузка» остаются включенными до тех пор, пока токи превышают заданную уставку. Если на регулируемой секции напряжение  $3U_0$  превышает уставку, то «Прибавить», запрещается выдача команды включается светодиод «Блокировка по  $3U_0$ ». При снижении напряжения  $3U_0$  ниже порогового гаснет светодиод «Блокировка», регулирование разрешается. Если на регулируемой секции напряжение  $U_2$  превышает уставку, то команда «Прибавить» запрещается, включается светодиод «Блокировка по  $U_2$ ». При снижении напряжения  $U_2$  ниже порогового гаснет светодиод «Блокировка по  $U_2$ », разрешается регулирование вверх. Если на регулируемой секции действующее значение напряжения ниже  $U_{min}$ , то любое регулирование запрещается, включается светодиод «Низкое напряжение». При повышении

напряжения выше  $U_{min}$  гаснет светодиод «Низкое напряжение», регулирование разрешается.

Если на регулируемой секции действующее значение напряжения оказывается больше  $U_{max}$ , то запускается подсчет времени ТЗ (задержка формирования команды «Убавить» при перенапряжении) и включается светодиод «Перенапряжение», а также надпись на экране «Перенапряжение». Если спустя это время входное напряжение остается больше уставки, то запускается программа на отработку перенапряжения, выдавая команду «Убавить» через ТЗ после завершения очередного цикла переключения, пока напряжение не снизится до напряжения поддержания. Светодиод «Перенапряжение» гаснет при напряжении меньше  $U_{max}$ . Надпись на экране останется до сброса.

6. Если при анализе токов и напряжений граничные условия не нарушены, то проверяется условие:

$$U_{\text{рац}} - \Delta U / 2 < U_{\text{тек}} < U_{\text{рац}} + \Delta U / 2$$
 (3.19)

где:  $U_{\text{рац}}$  — рациональное значение напряжения поддержания;  $U_{\text{тек}}$  — текущее значение напряжения на регулируемой секции.  $\Delta U$  — уставка по напряжению зоны нечувствительности Если напряжение находится в пределах (3.19), переключения РПН не происходит.

7. Если происходит понижение напряжения и выход за зону нечувствительности:

$$U_{\text{\tiny TEK}} < U_{\text{\tiny DAII}} - \Delta U / 2 \tag{3.20}$$

то включается светодиод «U<нормы» и запускается подсчет времени Т1 (задержка формирования первичной команды на управление приводом). В течение этого времени контролируется выполнение условия (3.20).

Если условие (3.20) перестает выполняться, то сбрасывается подсчет Т1 и выключается светодиод «U<нормы».

Если условие (3.20) выполняется, то через время Т1 включается реле «Прибавить». Запускается подсчет Т1 (время проверки реакции привода на команду управления). Проверяется сигнал «Переключение». Если за время

Т1 от привода не пришел сигнал о начале переключения, то включается светодиод «Привод не пошел», включаются реле «Сигнализация» и реле «Отказ ПМ», отключаются реле «Прибавить» и «Убавить», на индикатор выводится сообщение «ПМ не пошел». Если в течение Т1 приходит сигнал от привода о начале переключения, то включается светодиод «Переключение», через задержку Т3 выключается реле «Прибавить» (если задан непрерывный режим работы, то реле выключается, когда напряжение достигнет зоны нечувствительности), запускается подсчет выдержки времени Т2 (время отработки команды управления). Если за это время от привода не пришел сигнал об окончании переключения, то включается светодиод «Привод застрял», включаются реле «Сигнализация» и реле «Отказ ПМ», на индикатор выводится сообщение «ПМ застрял». Если в течение времени T2 сигнал от привода сбросился, то выключается светодиод «Переключение», увеличивается значение счетчика текущего положения УРПН и счетчика выработанного ресурса. На индикатор выводится новое значение счетчика положения УРПН.

8. Проверяется условие (3.19). Если ОНО выполняется, TO сбрасываются признаки регулировки напряжения (увеличения И уменьшения). Если условие не выполняется, то проверяются условия (3.20) и (3.21):

$$U_{\text{\tiny TEK}} > U_{\text{\tiny DBII}} + \Delta U / 2 \tag{3.21}$$

Если выполняется условие (3.21), т.е. за предыдущий шаг регулирования напряжение не достигло зоны нечувствительности, то включается (подтверждается включение) светодиод «Uнормы» и реле «Убавить». Выдержка времени будет снова равной Т1.

Если обнаружено перенапряжение ( $U_{\text{тек}} > U_{\text{max}}$ ), то включается (или «U>нормы» подтверждается включение) светодиод И светодиод «Перенапряжение», на индикатор выводится сообщение: «Перенапряжение», запускается подсчет выдержки времени Т3 (задержка формирования очередной управление приводом отработке команды на при

перенапряжения). Если спустя это время перенапряжение сохраняется, то, при условии задания уставки «Сигнализация при блокировке», включается реле «Сигнализация», устанавливается признак перенапряжения, запускается программа снижения напряжения. Переключения вниз будут продолжаться до тех пор, пока выполняется условие (3.21), т. е. пока напряжение не вернется в зону нечувствительности. При  $U_{\text{тек}} < U_{\text{max}}$  гаснет светодиод «Перенапряжение». Перед каждым переключением дается задержка ТЗ. При снижении напряжения до значения  $U_{\text{тек}} < U_{\text{рац.}} + \Delta U/2$  выключается светодиод «U>нормы», снимается запрет на выдачу команды «Прибавить», сбрасывается признак перенапряжения.

Если при отсутствии команд управления «Прибавить» или «Убавить» обнаружен сигнал «Переключение», то включается светодиод «Переключение», а по снятию этого сигнала запрещается регулирование напряжения, включается реле «Сигнализация» и реле «Отказ ПМ», светодиод «Привод побежал», включается реле «Питание ПМ», отключающее питание привода. На индикатор выводится сообщение «ПМ побежал».

Алгоритм принятия решения регулирующим устройством на выдачу управляющего воздействия представлен на рисунке 3.4.

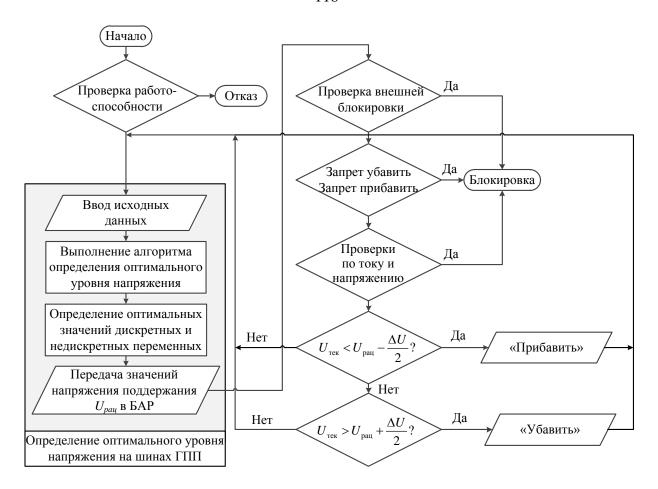


Рисунок 3.4 — Алгоритм принятия решения регулирующим устройством на выдачу управляющего воздействия для регулирования напряжения

Алгоритм обеспечивает оптимальный уровень напряжения на шинах силовых трансформаторов, позволяющий поддерживать рациональные режимы напряжения у электроприемников, расположенных в начале и конце питающих линий в часы максимума и минимума нагрузки.

#### 3.4. Выводы по главе 2

1. Разработан алгоритм оптимизации уровня напряжения в СЭС угольной шахты. В его рамках предложено выполнять совместную оптимизацию дискретных и недискретных переменных путем формирования матриц состояний. Для ускорения расчетов, при формировании матрицы состояний в отношении РПН трансформаторов ГПП предложено учитывать

только соседние номера положений ступеней регулирования устройства РПН.

- 2. Предложенный алгоритм учитывает ранее полученные статические характеристики нагрузки по напряжению, что повышает его точность и достоверность.
- 3. Анализ показал, что для выполнения симуляции текущего режима работы угольной шахты необходимо использовать метод Ньютона с определением коэффициента демпфирования по схеме Энеева Матвеева. Данный метод обладает высокой сходимостью и может применяться для расчета режимов СЭС любой конфигурации, в том числе режимов близких к предельным режимам.
- 4. В качестве методов оптимизации недискретных переменных наиболее современных предложено рассмотреть два метода: метод внутренней точки метод последовательного И квадратичного программирования. В рамках практической части необходимо выполнить сравнение ЭТИХ алгоритмов ПО параметрам: эффективность ДВУМ оптимизации и скорость выполнения оптимизации.
- 5. Поскольку устройство РПН трансформаторов на ГПП обладает ограниченным ресурсом, предложено выполнять переключения ступеней устройства РПН с учетом показателя экономической эффективности, предложенного в ранее выполненных научных исследованиях.

## 4. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ОПТИМАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ УГОЛЬНЫХ ШАХТ

### 4.1. Выбор среды моделирования и оптимизации

С целью оценки эффективности оптимального регулирования напряжения необходимо выполнить математическое моделирование СЭС угольной шахты, последовательный расчет заданных режимов работы СЭС и их оптимизацию с использованием предложенного алгоритма.

Для решения поставленной задачи целесообразно рассмотреть функционал уже существующих программно-вычислительных комплексов применяемых для расчета и оптимизации электрических режимов (EUROSTAG, POWERFACTORY, RastrWin и др.).

В работе [101] было отмечено, что наиболее эффективным программным комплексом для расчета и оптимизации электрических режимов является RastrWin. В рамках тестируемого алгоритма оптимального регулирования напряжения, программный комплекс RastrWin может быть использован в качестве среды для расчета электрического режима. Однако в связи с отсутствием рассматриваемых нами методов оптимизации в среде программного комплекса RastrWin необходима разработка отдельной программы для их реализации.

В связи с этим, возможно два варианта практической реализации оптимального регулирования напряжения.

Первый вариант: использование программного комплекса RastrWin в качестве среды для расчета электрического режима и выполнение оптимизации с помощью программы, написанной в среде MATLAB.

Главное преимущество этого варианта состоит в том, что программный комплекс RastrWin является лицензированным и проверен на практике. Однако есть недостаток, который заключается в сложности обработки

данных программного комплекса в среде MATLAB. Также требуется написание специального макроса в среде RastrWin для обмена данными со средой MATLAB. При этом программный комплекс RastrWin имеет закрытый код, что препятствует развитию алгоритма для выполнения дальнейших исследований.

Второй вариант состоит В использовании одного языка программирования для описания среды моделирования и оптимизации. Существует огромное разнообразие различных языков программирования, обладающих своими преимуществами. Наиболее целесообразно использовать языки программирования, не требующие предварительной компиляции.

Под вышеуказанные требования подходят два языка программирования, имеющие обширную библиотеку: PYTNON и MATLAB. Язые программирования PYTNON является открытым языком и обладает большей гибкостью, а также позволяет реализовывать более сложные алгоритмы. Язык программирования MATLAB имеет встроенные математические функции, которые облегчают реализацию разработанного нами алгоритма оптимизации уровня напряжения.

Для оптимизации параметров электрических сетей в двух вариантах предполагается использование пакета расширений Optimization Toolbox. Данный пакет расширений позволяет cвысокой точностью эффективностью реализовать метод последовательного квадратичного программирования (SQP) и метод внутренней точки (Interior point). Optimization Toolbox использован в работе для решения задачи оптимизации недискретных переменных. С помощью Optimization Toolbox задаются переменные, а также критерии оптимизации (минимум потерь активной мощности). В задачу оптимизации также вводятся ограничения по генерации (потреблению) реактивной мощности и допустимым уровням напряжения в узлах сети.

Учитывая, что планируется дальнейшее развитие предложенного алгоритма, в качестве среды программирования был выбран пакет прикладных программ MATLAB со встроенным пакетом расширений Optimization Toolbox. Для удобства ввода и визуализации данных предлагается использовать табличный процессор MS Excel.

### 4.2. Предъявляемые требования и структура разработанной программы

Учитывая особенности алгоритма оптимального регулирования напряжения, разрабатываемая программа должна выполнять следующие функции:

- 1. Обеспечивать ввод данных о параметрах СЭС посредством табличного процессора MS Excel.
- 2. Выполнение расчета электрических режимов с использованием метода Ньютона по схеме Энеева Матвеева.
- 3. Формирование матрицы состояний исходя из количества дискретных переменных и их текущего значения.
- 4. Выполнение оптимизации значений недискретных переменных для каждого из состояний СЭС угольной шахты по критерию минимума потерь активной мощности в СЭС угольной шахты с использованием заданного метода оптимизации из пакета расширений Optimization Toolbox.
- 5. Формирование матрицы значений потерь активной мощности для каждого из состояний.
- 6. Определение оптимальных значений дискретных и недискретных переменных, а также оптимальных значений напряжений на шинах подстанции.
- 7. Сохранение полученных данных в табличном процессоре MS Excel.

- 8. Определение расчетного оптимального напряжения для реализации работы устройства АРНТ по алгоритму, представленному в главе 3.
- 9. Выполнение расчета и оптимизация режима для заданных значений нагрузки (P,Q).

С учетом вышеуказанных требований была разработана программа, обеспечивающая апробацию предложенного алгоритма оптимального регулирования. Обобщенная структурная схема программы представлена на рисунке 4.1. Структура разработанной программы включает таблицы ввода/вывода данных (MS Excel) и набор подфункций реализуемых в среде программирования MATLAB.

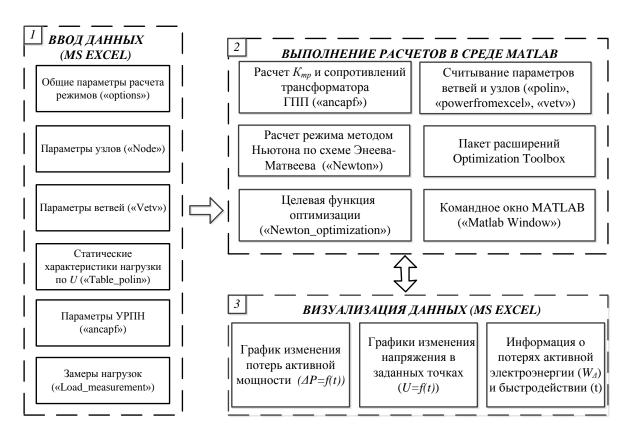


Рисунок 4.1 – Обобщенная структурная схема разработанной программы

Программа включает три блока, реализуемых в среде MATLAB и MS Excel.

Блок 1 реализован в среде MS Excel и представляет совокупность таблиц, включающих в себя информацию о параметрах расчета режимов, элементов СЭС.

В таблицу «общие параметры расчета режима» вводится информация о точности расчета режима, максимальном числе итераций и ограничениях при расчете режима методом Ньютона по схеме Энеева – Матвеева.

В таблицу «Параметры узлов» вводятся данные об узлах СЭС (порядковый номер, состояние узла, значение нагрузки и генерации, тип статических характеристик нагрузки по напряжению, пределы генерации по реактивной мощности и пр.).

В таблицу «Параметры ветвей» вводятся данные о ветвях СЭС (порядковый номер, номера узлов начала и конца ветви, тип, название, состояние, параметры схемы замещения, номер ступени регулирования РПН и пр.).

В таблицу «Статические характеристики нагрузки» вводятся данные о коэффициентах полиномов, предварительно рассчитанных в соответствии с алгоритмами, представленными в главе 3.

В таблицу «Параметры УРПН» вводятся данные об УРПН (шаг регулирования, число ступеней регулирования, ширина зоны нечувствительности, число нейтральных ступеней регулирования).

В таблицу «Замеры нагрузок» вводится информация о значениях активной и реактивной нагрузки с разбивкой по временным промежуткам.

Подробная информация о структуре таблиц для ввода исходных данных представлена в приложении 4.

Блок 2 реализован в программной среде MATLAB в виде подфункций осуществляющих обработку исходных данных, формирование матриц для расчета электрического режима, расчет режима и его последующую оптимизацию.

Подфункция «Расчет  $K_{mp}$  и сопротивлений трансформатора» выполняет определение коэффициента трансформации и сопротивлений в соответствии с зависимостями, представленными в главе 3.

Подфункция «Считывание параметров узлов и ветвей» выполняет обработку данных, представленных в среде MS Excel. Данные обрабатываются и приводятся в форму, приемлемую для выполнения расчета и оптимизации электрического режима.

Подфункция «Расчет электрического режима методом Ньютона по схеме Энеева-Матвеева» выполняет расчет электрического режима и выводит в среду MATLAB результаты расчета. Подфункция расчета электрических режимов была протестирована с использованием схем электроснабжения различной конфигурации. Полученные результаты были сопоставлены с результатами расчета программного комплекса RastrWin для аналогичных схем. В результате была выявлена достоверность и правильность функционирования блока расчета электрических режимов.

Подфункция «Целевая функция оптимизации» включает себя целевую функцию оптимизации (3.1) с заданными граничными условиями. В рамках этой подфункции выполняется формирование матрицы состояний СЭС.

Пакет расширений Optimization Toolbox служит для выполнения напряжения оптимизации уровня ПО одному из заданных методов оптимизации (метод внутренней точки метод последовательного И квадратичного программирования).

В командном окне MATLAB вводятся команды для выполнения расчета и оптимизации электрического режима.

Данные полученные в блоке 2 передаются в блок 3 «Визуализация данных». Блок 3 позволяет визуализировать данные переданные в МS Excel из среды MATLAB. В нем выполняется визуализация графиков изменения потерь активной мощности, уровня напряжения в заданных точках. Также выдается информация о потерях активной энергии за расчетный период и быстродействии.

На разработанную программу подана заявка в Федеральное государственное учреждение «Федеральный институт промышленной собственности» (ФГУ ФИПС) на государственную регистрацию программы ЭВМ (Приложение 5).

### 4.3. Разработка тестовой схемы СЭС угольной шахты

Разработка модели СЭС угольной шахты включает в себя следующие этапы:

- определение топологии сети и длин участков КЛ;
- определение параметров оборудования;
- задание параметров устройств регулирования напряжения;
- определение статических характеристик нагрузки по напряжению
   с использованием алгоритмов представленных в главе 3;
  - задание графиков нагрузки узлов;
  - ввод данных в среду табличного процессора MS Excel;
- выполнение тестирования полученной модели посредством выполнения расчета электрических режимов;
  - устранение возможных ошибок в исходных данных;

В качестве объекта компьютерного моделирования была принята тестовая схема (рисунок 4.2), разработанная на базе схемы СЭС АО «Шахта им. С.М. Кирова» (ПС 35 кВ №111 Озерная).

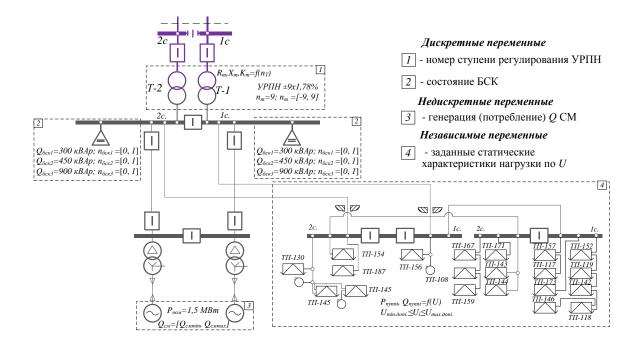


Рисунок 4.2 – Исходная схема для моделирования

Границами моделирования приняты ввода ПУПП и граница раздела эксплуатационной ответственности с энергоснабжающей организацией. Граница раздела эксплуатационной ответственности проходит на вводах 35 кВ.

Электроснабжение тестовой СЭС осуществляется по двум ВЛ 35 кВ. Уровень напряжения на шинах 35 кВ определяется режимом работы энергосистемы. На ГПП установлены два трансформатора номинальной мощностью 10 МВА. ГПП осуществляет питание только подземных потребителей угольной шахты. Подземные РПП получают питание по магистральной схеме от двух фидеров ГПП. Далее мощность распределяется между ПУПП, к которым подключено оборудование лавы. Общее число элементов СЭС в сети 6 кВ: 63, в том числе кабели (35 присоединений общей длиной около 25 км, диапазон длин присоединений — от 10 до 2980 м, диапазон сечений кабельных жил присоединений от 3 х 50 мм² до 2 х (3 х 120) мм², а также 51 АД суммарной установленной мощностью 9515 кВт; средняя мощность двигателей 186,5 кВт (15 имеют мощность свыше 100 кВт;

минимальная мощность – 0,75 кВт). Прочая (недвигательная) нагрузка 0,127 кВ представлена освещением.

В тестовую схему дополнительно включены недискретные источники реактивной мощности, представленные генераторами с номинальной мощностью 1,5 МВт.

После задания всех параметров была получена имитационная модель, представленная на рисунке 4.3.

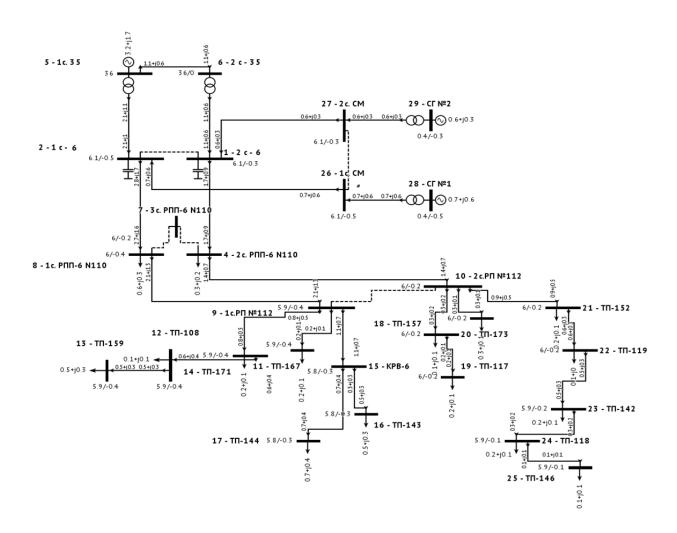


Рисунок 4.3 – Имитационная модель СЭС угольной шахты

В процессе работы имитационной модели были получены графики изменения напряжения во времени. На рисунке 4.4 показан график изменения активной нагрузки и коэффициента активной мощности. Далее представлены графики изменения напряжения в относительных единицах на

шинах ГПП, на шинах РП и расчетный уровень напряжения на зажимах электродвигателей очистного комплекса. Данные графики представлены на рисунке 4.5. В целом полученный график изменения напряжения соответствует фактическим данным, представленным на рисунке 1.8. В периоды времени, соответствующие провалам напряжения на рисунке 1.8, наблюдается снижение напряжения, вызванное увеличением нагрузки.

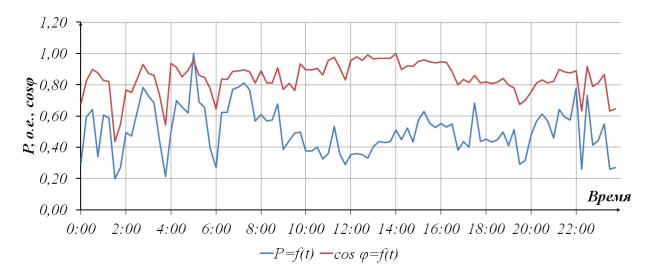


Рисунок 4.4 — Суточный график изменения активной мощности и коэффициента активной мощности от времени на шинах подстанции

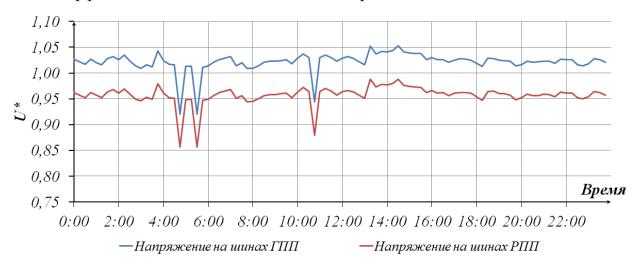


Рисунок 4.5 – График изменения уровня напряжения на шинах ПС, РПП и зажимах электродвигателей комбайнов

В процессе моделирования также получены данные об изменении уровня потерь активной энергии в течение суток.

При этом суммарный уровень потерь активной электрической энергии за 24 часа может быть определен по формуле:

$$\Delta W_{P\Sigma} = \int_{0}^{t} \Delta P dt = \frac{\sum_{i=1}^{96} \Delta P_{i}}{4}, \kappa B m \cdot u$$
(4.1)

где  $P_i$ - потребление активной мощности в момент времени i, кВт; i – порядковый номер временного промежутка, начиная с 00:00.

В результате моделирования режима работы СЭС угольной шахты было получено, что суммарный уровень потребления активной электрической энергии за 24 часа составляют 82,7 тыс. кВт·ч, тогда как потери активной энергии составили 8,22 тыс. кВт·ч.

# 4.4. Сравнение двух методов оптимизации: метода SQP и метода внутренней точки

Предложенный алгоритм оптимального регулирования уровня напряжения базируется на одном из двух методов оптимизации: метод последовательного квадратичного программирования и метод внутренней точки. Несмотря на то, что теоретически они должны давать идентичные результаты их нужно сравнить по двум показателям: эффективность снижения потерь активной энергии и быстродействие. В результате будет возможно выбрать наиболее эффективный алгоритм и использовать его для оптимизации уровня напряжения в СЭС угольной шахты.

На базе разработанной имитационной модели выполнена оценка предложенных методов оптимизации.

Результаты имитационного моделирования позволили оценить потери активной электроэнергии и отклонения напряжения при регулировании. Суточные графики изменения потерь активной энергии при использовании двух методов оптимизации представлены на рисунке 4.6. Данные об уровнях напряжения на шинах ПС представлены на рисунке 4.7.

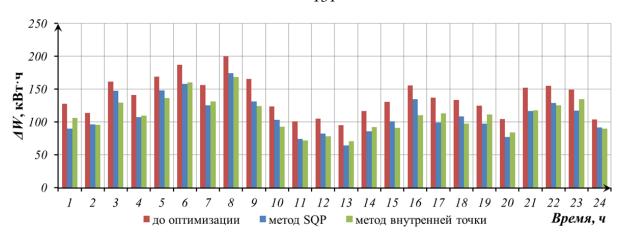


Рисунок 4.6 – Суточный график изменения потерь активной электроэнергии в СЭС угольной шахты

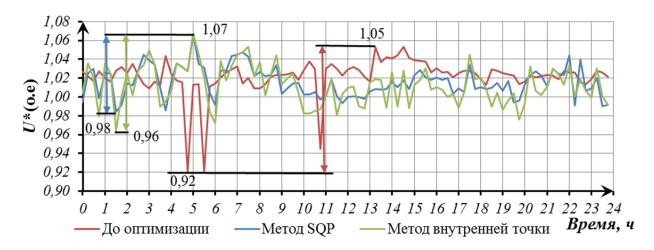


Рисунок 4.7 – Суточные графики изменения отклонения напряжения на шинах подстанции

Данные рисунка 4.6 показывают, что уровень потерь активной мощности при использовании метода последовательного квадратичного программирования (SQP) на 2-3% ниже уровня потерь активной мощности при использовании метода внутренней точки. При использовании обоих алгоритмов отклонения напряжения не выходят за допустимые пределы.

Причина подобного отклонения связана с отличием уровня напряжения в сети при использовании разных алгоритмов. При использовании метода внутренней точки уровень напряжения в сети отличается от уровня напряжения при использовании метода последовательного квадратичного программирования. Это связано с отличием положений анцапф устройства

РПН на трансформаторе ГПП (при использовании метода SQP – «-1» положение, при использовании метода внутренней точки – «-2» положение).

Таким образом, проведенный сравнительный анализ двух методов оптимизации показал, что два метода оптимизации могут давать разные результаты при использовании одних и тех же исходных данных. При использовании двух алгоритмов соблюдаются граничные условия и получаются близкие результаты, но значения зависимых переменных не одинаковы. Это показывает, что могут существовать решения с близкими значениями целевой функции, но различными значениями переменных. При этом функция регулирования напряжения не является выпуклой, что связано с тем, что в регулировании участвуют БСК и УРПН трансформаторов. Итоговые результаты, полученные с использованием двух методов оптимизации, представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1. – Результаты оптимизации с использованием двух методов

Наименование	Наименование метода оптимизации		
параметра	Без оптимизации	Метод SQP	Метод внутренней точки
$W_{\text{потр}}$ , тыс. к $\mathrm{B}\mathrm{T}^{\cdot}\mathrm{\Psi}$	82,7	81,4	81,6
$\Delta W_{P\Sigma}$ , тыс. к $\mathrm{B}\mathrm{T}^{\cdot}$ ч	8,22	7,65 (-7%)	7,85 (-4,5%)
<i>∆U</i> , %	-8 ÷ (+5)	-2 ÷ (+7)	-4÷ (+7)
$U_{min}$ , к ${ m B}$	5,6	5,9	5,8
$U_{max}$ , к ${ m B}$	6,3	6,4	6,4
Среднее время оптимизации, с	-	2,5	4,8

Данные таблицы 4.1 показывают, что метод последовательного квадратичного программирования (SQP) оказался наиболее эффективным и позволил снизить уровень потребления активной мощности на 7 % (с 8,22 до 7,65 тыс. кВт·ч в сутки), при этом снизился диапазон отклонения

напряжения. Необходимо отметить, что метод последовательного (SQP) обладает квадратичного программирования преимуществом быстродействии. В связи с этим, для реализации предложенной системы регулирования был тринят метод последовательного квадратичного программирования (SQP). Отметим, что эффективность рассмотренных нами методов оптимизации находится примерно на одном уровне и варьируется в зависимости от поставленной задачи и параметров математической модели [79].

## 4.5. Оценка экономического эффекта оптимального регулирования уровня напряжения

С целью определения эффективности полученных результатов оптимизации был произведен расчет экономического эффекта.

Критерием экономической эффективности в данном случае является минимум приведенных затрат, которые складываются из затрат на систему регулирования и затрат на потери активной энергии в СЭС.

Затраты на потери активной электроэнергии в СЭС угольной шахты выражаются по формуле [102]:

$$3_{\Pi} = c_{3} \Delta W_{P}$$
, тыс.руб. (4.2)

где  $c_9$  – удельная стоимость потерь активной энергии, руб./кВт·ч;  $\Delta W_P$  – активные потери электрической энергии, кВт·ч,  $3_{\rm n}$  - затраты на приобретение потерь активной электрической энергии, тыс. руб.

При отсутствии устройства автоматического регулирования напряжения или его неисправности потребуется установка нового устройства РПН и АРНТ. В таком случае затраты на установку подобной системы можно оценить по формуле:

$$3_{\kappa} = c \cdot 3_{PIIH}, \text{ mыс.py6.}$$
 (4.3)

где  $3_{P\Pi H}$  – затраты на приобретение устройства РПН и АРНТ, тыс. руб; c – коэффициент учитывающий затраты на монтаж УРПН и АРНТ.

В процессе расчета экономического эффекта от внедрения системы взаимосвязанного регулирования напряжения также был определен срок окупаемости мероприятий.

Получаемая годовая экономия от использования системы оптимального регулирования напряжения определяется по формуле:

$$Θ = ΔPΛc3τ, mыс.pyб.$$
(4.4)

где  $\Delta P_{\Delta}$  — разность потерь активной мощности до и после внедрения системы оптимального регулирования напряжения, кВт;  $c_{_{9}}$  — стоимость электроэнергии, руб/(кВт·ч);  $\tau$  — число часов максимальных потерь в год, ч.

Тогда с учетом формулы (4.2) срок окупаемости системы оптимального регулирования напряжения составит:

$$T_{\rm or} = \frac{3_{\rm k}}{\Delta P_{\rm A} c_{\rm o} \tau},\tag{4.5}$$

Приняв стоимость электроэнергии для предприятий угольной промышленности равной 2,0 руб./кВт·ч, число часов максимальных потерь 5760 часов, были определены затраты на потери мощности, приведенные затраты и срок окупаемости мероприятий в соответствии с формулами (4.3)–(4.5). Результаты расчетов сведены в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 – Результаты расчета экономической эффективности

	Схема без использования	Схема с использованием	
Характеристики	алгоритма оптимального	алгоритма оптимального	
	регулирования напряжения	регулирования напряжения	
Затраты на потери			
электро-	9151,7	8711,7	
энергии $3_{_{\rm II}}$ , тыс. руб.			
Затраты на установку		1430/500*	
УРПН и АРНТ, тыс. руб.	-	1430/300	
Приведенные затраты 3,	9151,7	10179,7/8711,7*	
тыс. руб.	9131,7	10179,7/8711,7	
Экономический эффект,		440	
тыс. руб.	-	440	
Срок окупаемости $T_{ok}$ ,	_	3,25/1,14*	
лет	-	3,23/1,14	

<sup>\*</sup>при наличии УРПН и АРНТ в нормальном эксплуатационном состоянии.

Результаты проведенного компьютерного моделирования показали, что внедрение системы взаимосвязанного регулирования позволило снизить затраты на потери электроэнергии с 9151,7 тыс. руб. до 8711,7 тыс. руб. Затраты на реализацию оптимального регулирования напряжения составили 1430 тыс. рублей при условии, что УРПН требует замены. Срок окупаемости составит 3,25 года. При наличии УРПН в нормальном эксплуатационном состоянии срок окупаемости составил 1,14 лет.

Таким образом, реализация, предложенной системы взаимосвязанного регулирования напряжения по критерию минимума потребления активной мощности на основе совмещенной оптимизации с использованием метода оптимизации SQP показала достаточную эффективность. В результате оптимизации снизился уровень потребления активной мощности, повысились технико-экономические показатели сети. Применение разработанной регулирования обеспечивает системы напряжения значительное повышение энергоэффективности СЭС угольной шахты.

# 4.6. Предлагаемая реализация оптимального регулирования напряжения в рамках SCADA-систем угольных шахт

На угольных шахтах Кузбасса постоянно повышается уровень автоматизации технологических процессов. Например, на базе АО «СУЭК Кузбасс» в 2014 году создан Единый информационно-аналитический центр (ЕИАЦ) [104]. В нем используется программно-инструментальный комплекс для реализации автоматизированных систем управления технологическими процессами (SCADA Infinity), внедренный в эксплуатацию в рамках проекта «Разработка системы, предназначенной для оперативного мониторинга основных параметров производственных процессов добычи и обогащения угля, анализа эффективности использования ресурсов предприятия, контроля качества продукции и оценки параметров безопасности ведения работ» [105].

Программный комплекс (ПК) SCADA Infinity обрабатывает информацию, получаемую от 11 угольных предприятий компании (9 шахт и 3 разреза).

### В ПК SCADA Infinity объединены следующие системы:

- производственные системы (добыча (очистной комбайн),
   проходческие комбайны, ленточный транспорт, подъем, весы конвейерные,
   погрузка и контроль качества, электроснабжение);
- системы безопасности и жизнеобеспечения (система наблюдения, оповещения и поиска людей, застигнутых аварией, газовая защита, противопожарная защита и водоснабжение, вентиляция, водоотлив, теплоснабжение).

### ПК SCADA Infinity выполняет следующие функции:

- получение данных о состоянии технологического оборудования и параметрах технологического процесса;
  - получение диагностических данных о состоянии оборудования;
  - передача команд телеуправления и телерегулирования;
  - приведение полученных данных к необходимым размерностям;
  - контроль достоверности значений технологических параметров;
  - отслеживание связи с источниками данных;
- получение данных от сторонних OPC DA серверов в качестве клиента;
- получение данных от существующих ЛСА, не поддерживающих
   OPC, по согласованным протоколам передачи данных;
- получение доступа к БД ЛСА жизненно важных технологических систем, не поддерживающих OPC;
- предоставление доступа к оперативным данным по спецификации OPC DA.
- количество подключений к системе для получения информации не имеет ограничений.

Структура предлагаемой системы сбора и передачи информации СЭС угольной шахты (на базе SCADA Infinity) представлена на рисунке 4.5.

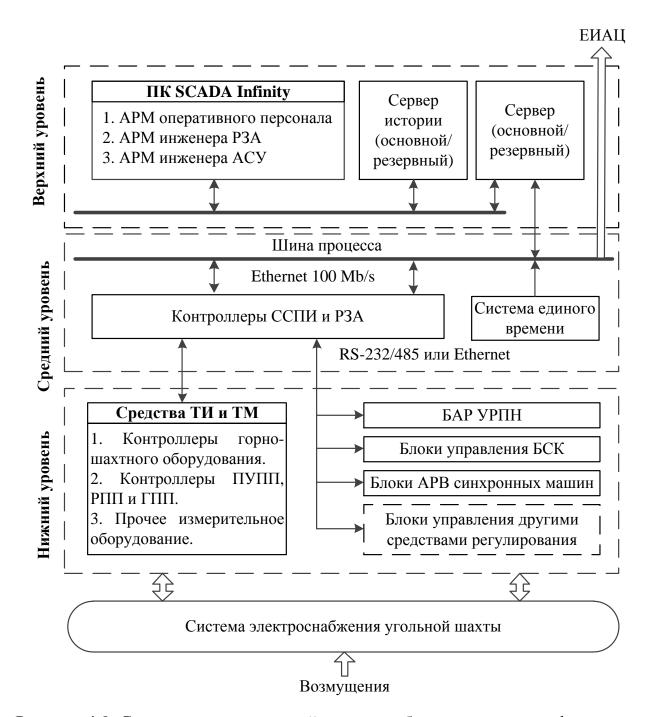


Рисунок 4.8. Структура предлагаемой системы сбора и передачи информации СЭС угольной шахты (на базе SCADA Infinity)

Система позволяет реализовать разработанный алгоритм оптимального регулирования напряжения и включает следующие подсистемы:

1. Подсистема нижнего уровня. Включает в себя измерительный комплекс (измерительные трансформаторы тока и напряжения, датчики тока и напряжения, встроенные в горно-шахтное оборудование;

микропроцессорные счетчики), который осуществляет обработку параметров режима в режиме реального времени. Сигналы на этом уровне могут существовать в аналоговой (датчики тока и напряжения) и в цифровой форме (контроллеры горно-шахтного оборудования и ПУПП). Для реализации связи с микропроцессорными счетчиками используется модемный интерфейс RS-232 или RS-485. Современные шахтные подземные подстанции (например, КТСВП-УХЛ-ВВ) имеют цифровой интерфейс RS-485 для выполнения задачи автоматизации И диспетчеризации. Также они позволяют осуществлять контроль тока и напряжения в силовых цепях[106]. На современном горно-шахтном оборудовании также предусмотрены датчики тока и напряжения, информация от которых может быть передана в систему SCADA посредством канала Ethernet [107].

Данные о значениях тока и напряжения от измерительных трансформаторов тока и напряжения по каналам связи поступают на аналоговые входы контроллера. В случае если на ПУПП имеется свой контроллер с интерфейсом RS-485, сигнал передается на дискретный вход программируемого контролера системы SCADA.

К подсистеме нижнего уровня также относятся блоки управления средствами регулирования напряжения: БАР РПН, блок управления БСК, блок АРВ СМ. Они могут быть подключены к системе SCADA Infinity посредством интерфейсов RS-485 и Ethernet.

- 2. Подсистема среднего уровня. Включает в себя промежуточные контроллеры, принимающие данные от контроллеров и датчиков нижнего уровня. Их основная задача сбор данных и передача сигналов управления в отношении лавного оборудования.
- 3. Подсистема верхнего уровня. На этом уровне получаемые данные OT подсистем нижнего И среднего уровня классифицируются визуализируются. Ha основании полученных данных, ПО заданным алгоритмам формируются управляющие сигналы.

Отметим, что ПК SCADA Infinity обеспечивает гибкую и быструю разработку SCADA-систем [105]. В частности SCADA Infinity позволяет разрабатывать алгоритмы контроля и управления технологическими процессами с помощью встроенных языков программирования VBA, C#. Таким образом, в рамках ПК SCADA Infinity возможно реализовать алгоритм оптимального регулирования напряжения в СЭС угольных шахт.

Реализация предложенного алгоритма работы системы регулирования напряжения в среде SCADA Infinity (для 9 включенных в нее шахт) ориентировочно позволит снизить затраты на потери электроэнергии на величину до 9 млн. руб. в год. При этом будет повышено качество электроэнергии по показателю «отклонение напряжения» в условиях изменения режима работы системообразующей сети.

Отметим, что для повышения эффективности алгоритма оптимального регулирования напряжения целесообразно выполнение исследований в области развития методов оперативного прогнозирования электрических нагрузок в СЭС угольных шахт.

#### 4.7. Выводы по главе 4

- 1. Разработана программа на базе языка программирования МАТLAB, позволяющая реализовать разработанный алгоритм оптимизации уровня напряжения в СЭС угольной шахты по критерию минимума потерь активной мощности.
- Разработана имитационная модель для тестовой СЭС угольной шахты, на основе которой выполнено апробирование разработанного Апробирование алгоритма. производилось c использованием алгоритмов оптимизации: метод последовательного квадратичного программирования и метод внутренней точки. В результате анализа установлено, что наиболее эффективным алгоритмом является метод последовательного квадратичного программирования.

- 3. По итогам реализации предложенного алгоритма доказано, что взаимосвязанное регулирование позволяет снизить потери активной электроэнергии на 7%.
- 4. В результате симуляции разработанного алгоритма в тестовой СЭС доказано, что экономический эффект от внедрения предложенного алгоритма составит 440 тыс. рублей (для ГПП с трансформаторами мощностью 10 МВА). При сроке окупаемости от 1,14 до 3,25 лет. Разработанный алгоритм оптимального регулирования напряжения может быть использован при развитии концепции «умных сетей электроснабжения» (SmartGrid) в рамках СЭС промышленных предприятий, в том числе при наличии объектов распределенной генерации.
- 5. Предложена структура системы сбора и передачи информации СЭС угольной шахты, позволяющая реализовать оптимальное регулирование напряжения с использованием существующего программно-инструментального комплекса для автоматизированных систем управления технологическими процессами (SCADA Infinity).
- 6. Реализация предложенного алгоритма работы системы регулирования напряжения в среде SCADA Infinity (для 9 включенных в нее шахт) ориентировочно позволит снизить затраты на потери электроэнергии на величину до 9 млн. руб. в год.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации содержится решение актуальной задачи снижения потерь электроэнергии в СЭС угольных шахт и повышения их энергоэффективности при оптимальном регулировании напряжения, имеющей значение для предприятий угольной промышленности.

На основании проведенных исследований получены следующие результаты.

- 1. Установлено, что существующие средства регулирования напряжения (УРПН, БСК и СМ) в СЭС угольных шахт используются неоптимальным образом. При этом они не обеспечивают минимизации потерь электроэнергии при условии соблюдения нормативных отклонений напряжения на зажимах электроприемников.
- 2. С использованием разработанного алгоритма определения статических характеристик нагрузки АД по напряжению установлено, что регулирующий эффект реактивной нагрузки шахтовых АД по напряжению находится в пределах 0,95 ÷ 2,6%. Регулирующий эффект активной нагрузки шахтовых АД по напряжению незначителен и может не учитываться при регулировании напряжения.
- 3. Установлено, что регулирующие эффекты по напряжению для потерь активной и реактивной мощности в ПУПП изменяются в пределах  $-1,17 \div 0,51\%$  и  $-1,53 \div 0,79\%$  соответственно, и зависят от загрузки и номинальной мощности ПУПП.
- 4. Выявлено, что прирост потерь активной и реактивной мощности в трансформаторах ГПП при увеличении коэффициента трансформации незначителен и определяется коэффициентом загрузки трансформатора. При уменьшении коэффициента трансформации потери реактивной мощности уменьшаются, а характер изменения потерь активной мощности зависит от коэффициента загрузки трансформатора.

- 5. Предложен алгоритм оптимизации уровня напряжения по критерию минимума потерь активной мощности с учетом статических характеристик нагрузки по напряжению, определяющий оптимальные значения дискретных и недискретных параметров устройств регулирования напряжения.
- 6. Разработана имитационная модель СЭС угольной шахты, позволяющая моделировать оптимальное регулирование напряжения по критерию минимума потерь активной мощности согласно предложенному алгоритму, используя выбранные методы оптимизации недискретных переменных (метод последовательного квадратичного программирования и метод внутренней точки).
- 7. Определено, что реализация разработанного алгоритма позволит снизить потери активной электроэнергии на 7% и диапазон отклонения напряжения на 4%. При этом экономический эффект составит 440 тыс. руб. в год (для угольных шахт, питающихся от ГПП с трансформаторами мощностью 10 МВА), что свидетельствует о высокой эффективности предложенного алгоритма регулирования. В случае реализации алгоритма на базе программно-инструментального комплекса SCADA Infinity (внедрен на 9 шахтах Кузбасса) экономический эффект составит около 9 млн. руб. в год.

### Перспективные направления дальнейших исследований:

- 1. Исследование вопросов разработки перспективных средств индивидуального регулирования напряжения (ДКРМ, ВДТ, тиристорные УРПН).
- 2. Разработка алгоритма оптимизации размещения и конфигурации устройств компенсации реактивной мощности в СЭС угольных шахт.
- 3. Развитие механизмов активно-адаптивного управления уровнем напряжения в СЭС угольных шахт в рамках концепции «умных сетей электроснабжения» (Smart Grid).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абрамович, Б.Н. Интеллектуальная энергосистема предприятий минерально-сырьевого комплекса / Б. Н. Абрамович, Ю. А. Сычев, Д. А. Устинов // Академия энергетики, 2011. № 12. С. 72–76.
- 2. Насыров, Р.Р. Разработка системы активно-адаптивного регулирования напряжения в распределительных электрических сетях: Дис. канд. техн. наук. Москва, 2013. 132 с.
- 3. Малафеев, А.В. Оптимизация эксплуатационных режимов систем электроснабжения промышленных предприятий с собственными источниками электроэнергии: дис. канд. техн. наук. Магнитогорск, 2003. 212 с.
- 4. Жмак, Е.И. Регулирование напряжения в электроэнергетических системах на основе нечёткой логики: дис. канд. техн. наук. Новосибирск, 2004. 120 с.
- 5. Тарасов, Д. М. Управление режимом напряжения территориально рассредоточенных электроприемников горных предприятий: дис. канд. техн. Наук. Санкт-Петербург, 2003 147 с.
- 6. Шевчук, А. П. Повышение эффективности группового регулирования напряжения в распределительных сетях промышленных предприятий в условиях территориально рассредоточенных электропотребителей: диссертация ... кандидата технических наук, 2014. 135 с.
- 7. Canard, J-F. Impact de la génération d'énergie dispersée dans les réseaux de distribution: Ph.D. dissertation Institut National Polytechnique de Grenoble, 2000 212 p.
- 8. Caire, R. Gestion de la production decentralisée dans les réseaux de distribution: Ph.D. dissertation Institut National Polytechnique de Grenoble, 2004 213 p.

- 9. Rami, G. Contrôle de tension auto adaptatif pour des productions d'énergies décentralisées connectées au réseau de distribution: Ph.D. dissertation Institut National Polytechnique de Grenoble, 2006 175 p.
- 10. Richardot, O. Réglage coordonné de tension dans les réseaux de distribution à l'aide de la production décentralisée: Ph.D. dissertation Institut National Polytechnique de Grenoble, 2006 192 p.
- 11. Rahimi, S. Evaluation of Requirements for Volt/Var Control and Optimization Function in Distribution Management Systems / S. Rahimi, M. Marinelli, F. Silvestro // In Proceedings of 2012 IEEE International Energy Conference and Exhibition. IEEE. DOI: 10.1109/EnergyCon.2012.6347777 pp. 331-336.
- 12. Кудрин, Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий. Учебник для студентов высших учебных заведений / Б. И. Кудрин. — 2-е изд. — М.: Интермет Инжиниринг, 2006. — 672 с.
- 13. Абрамович, Б.Н. Специальные вопросы устройства систем электроснабжения. Надежность систем электроснабжения. СПб.: Изд. СПГГИ, 1997.
- 14. Абрамович, Б.Н. Регулирующие эффекты нагрузок промышленных предприятий и их использование в часы максимума энергосистемы / Б.Н. Абрамович, П.М. Каменев // Промышленная энергетика, 1988 №8.
- Абрамович, Б.Н. Совершенствование режима потребления электроэнергии на нефтедобывающих предприятиях / Б.Н. Абрамович, В.Я. Чаронов и др. // Нефтяное хозяйство, 1988 №7.
- 16. Абрамович, Б.Н. Регулирование электропотребления на предприятиях нефтедобычи / Б.Н. Абрамович, И. А. Чернявская, А.Н. Евсеев // В сб.: Реализация энергосбережения в промышленности в условиях полного хозрасчета и самофинансирования. Л. 1990.

- 17. Гамазин, С.И. Применение методов математического программирования при проектировании систем электроснабжения / С.И. Гамазин, В.В. Черепанов. Горький: Изд.ГГУ, 1980.
- 18. Харченко, М.А. Корреляционный анализ: Учебное пособие для вузов / М.А. Харченко. Воронеж: Изд-во ВГУ, 2008. 31 с.
- 19. Боровиков, В.П. STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере / В.П. Боровиков. СПб.: Питер, 2003. 500 с.
- 20. ГОСТ 24126-80 (СТ СЭВ 634-88). Устройства регулирования напряжения силовых трансформаторов под нагрузкой. Общие технические условия (с изменениями № 1, 2) Введ. 1982-01-01. М.: Издательство стандартов, 1988. 36 с.
- 21. ГОСТ 17500-72. Трансформаторы силовые. Устройства переключения ответвлений обмоток. Общие технические условия Введ. 1973-01-01., отмен. 1982-01-01. М.: Издательство стандартов, 1979. 24 с.
- 22. Техническое описание и инструкция по эксплуатации регулятора напряжения трансформаторов АРТ-ІМ и РНМ-1. Рига: Рижский опытный завод «Энергоавтоматика», 1988. 58 с.
- 23. Идельчик, В.И. Электрические системы и сети: учебник для вузов / В.И. Идельчик. М.: Энергоатомиздат, 1989. 592 с.
- 24. Об утверждении правил технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации [Электронный ресурс]: приказ Министерства энергетики РФ от 19 июня 2003 г. №229. Режим доступа: Система «Консультант плюс».
- 25. Михалков, А.В. Что нужно знать о регулировании напряжения / А.В. Михалков. М.: «Энергия», 1971. 56 с.
- 26. Непша, Ф. С. Особенности регулирования уровня напряжения в системах электроснабжения угольных шахт Кузбасса / Ф.С. Непша, В.М. Ефременко // Промышленная энергетика, 2017. № 11. С. 116—118.

- 27. Озерной, М.И. Электрооборудование и электроснабжение подземных разработок угольных шахт / М.И. Озерной. М.: Недра, 1975. 448 с.
- 28. Непша, Ф.С. Анализ проблемы использования устройств регулирования под нагрузкой трансформаторов на подстанциях Кемеровской области / Ф.С. Непша, В.М. Ефременко // Фёдоровские чтения 2017: XLVII Международная научно-практическая конференция с элементами научной школы (Москва, 15—17 ноября 2017 г.) / под общ. ред. Б.И. Кудрина, Ю.В. Матюниной. М.: Издательский дом МЭИ, 2017 С. 174—180.
- 29. Установка конденсаторная рудничная взрывозащищенная (УКРВ). Каталог продукции. // Заводы-изготовители горно-шахтного оборудования ЗАО "EXC". URL: http://oaoex.ru/upload/docs/ukrv-a-63-500-uhl5-specifications.pdf (дата обращения: 15.06.2017).
- 30. Абрамович, Б.Н. Моделирование электромеханических комплексов с синхронными двигателями в системе проведения математических расчетов MatLAB, пакет Simulink / Б.Н. Абрамович, Д.А. Устинов, Ю.Л. Жуковский, А.А. Круглый. СПб: Изд-во Нестор, 2007. 60 с.
- 31. Абрамович, Б.Н. Электромеханические комплексы с синхронными двигателями. Возбуждение, регулирование, устойчивость / Б.Н. Абрамович, А.А. Круглый, Д.А. Устинов. КG, Saarbrucken: Palmarium Academic Publishing. LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co, 2012. 370 с.
- 32. Сыромятников, И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / И.А. Сыромятников. М.: Энергоатомиздат, 1984. 240 с.
- 33. О долгосрочной программе развития угольной промышленности России на период до 2030 года [Электронный ресурс]: распоряжение Правительства РФ от 21 июня 2014 г. №1099-р. Режим доступа: Система «Консультант плюс».

- 34. Кудряшов, Д.С. Некоторые проблемные вопросы электроснабжения угольных предприятий Кузбасса / Д.С. Кудряшов, А.С. Ярош, О.В. Наумов // Безопасность труда в промышленности, 2014. №8. С. 69 71.
- 35. Чумаченко, В.В. Обеспечение качества электроэнергии и надежности электроснабжения крупного промышленного предприятия / В.В. Чумаченко, А.Р. Вериго // Журнал «Электроэнергия. Передача и распределение», 2018. № 2 (47). С. 38–43.
- 36. Пункт автоматического регулирования напряжения (ПАРН) на напряжение до 35 кВ. РЭ 3414-001-98648551-2015. Руководство по эксплуатации. // ООО «Сириус Санкт Петербург, 2012. 22 с.
- 37. Аржанников, Б. А. Устройства регулирования напряжения преобразовательных трансформаторов под нагрузкой : учеб. пособие / Б. А. Аржанников. Екатеринбург : УрГУПС, 2017. 101 с.
- 38. Аржанников, Б. А. Системы и элементы теории автоматического регулирования напря- жения в тяговом электроснабжении : учеб. пособие / Б. А. Аржанников. Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2014. 181 с.
- 39. Соснина, Е.Н. Опытная цифровая трансформаторная подстанция с активно-адаптивной системой управления и автоматическим плавным регулирование напряжения и мощности / Е.Н. Соснина, Р.Ш. Бетредтинов // Журнал «Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского», 2013. № 5 (1). С. 224–230.
- 40. Кабышев, А.В. Компенсация реактивной мощности в электроустановках промышленных предприятий: учебное пособие / А.В. Кабышев; Томский политехнический университет. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. 234 с.
- 41. Ивонин, Г. И. Исследование и разработка тиристорных регуляторов напряжения в участковых электрических сетях угольных шахт Кузбасса: автореферат дис. канд. техн. наук. Кемерово, 1971 17 с.

- 42. Маркушевич, Н.С. Регулирование напряжения и экономия электроэнергия / Н.С. Маркушевич. М.: Энергоатомиздат, 1984. 104 с.
- 43. Конюхова, Е. А. Режимы напряжений и компенсация реактивной мощности в цеховых электрических сетях / Е. А. Конюхова. М.: НТФ "Энергопрогресс", 2000. 56 с.
- 44. Вольдек, А. И. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы: Учебник для вузов / А. И. Вольдек, В. В. Попов. СПб.: Питер, 2008. 320 с.
- 45. Гойхман, В.М. Регулирование электропотребления и экономия электроэнергии на угольных шахтах / В.М. Гойхман, Ю.П. Миновский. М.: Недра, 1988. 190 с.: ил.
- 46. Иванов, В.С. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий / В.С. Иванов, В.И. Соколов. М.: Энергоатомиздат, 1987 336 с.
- 47. Идельчик, В.И. Расчеты и оптимизация режимов электрических сетей и систем / В.И. Идельчик. М: Энергоатомиздат, 1988. 278 с.
- 48. Железко, Ю. С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов / Ю. С. Железко. – М.: ЭНАС, 2009. – 456 с.
- 49. Конюхова, Е.А. Регулирование электропотребления промышленного предприятия при взаимосвязанном выборе режима напряжения и компенсации реактивной мощности: дис. докт. техн. наук. Москва, 1998. 455 с.
- 50. Хабдуллин, А. Б. Оптимизация режимов работы систем электроснабжения по статическим характеристикам потерь мощности и нагрузки: дис. канд. техн. наук: 05.09.03 Москва, 2012. 147 с.
- 51. Веников, В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах : учеб. для электроэнергетич. спец. вузов / В. А. Веников. 4-е изд., перераб. и доп. / В.А. Веников. М. : Высш. шк., 1985. 536 с.

- 52. Планков, А. А. Обоснование выбора Т-образной схемы замещения асинхронного двигателя при оценке устойчивости узлов систем электроснабжения с асинхронной нагрузкой / А. А. Планков, Е. В. Смолина, Я. Ю. Логунова // Современные инновации в науке и технике: Материалы II междунар. науч. практ. конф. Курск: 2012. С. 144-151.
- 53. Черных, И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB. SimPowerSystems и Simulink / И.В. Черных. М.: ДМК Пресс, 2007. 288 с.
- 54. Терёхин, В.Б. Моделирование систем электропривода в Simulink (Matlab 7.0.1): учебное пособие / В.Б. Терёхин. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. 292 с.
- 55. Качин, С.И. Электрический привод: учебно-методическое пособие / С.И. Качин, А.Ю. Чернышев, О.С. Качин. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. 157 с.
- 56. Вешеневский, С. Н. Характеристики двигателей в электроприводе / С. Н. Вешеневский. М.: Энергия, 1977. 432 с.
- 57. Фираго, Б.И. Регулируемые электроприводы переменного тока / Б.И. Фираго, Л.Б. Павлячик. М.: Техноперспектива, 2006. 363 с.
- 58. Проектирование электрических машин: учебник для бакалавров / под ред. И.П. Копылова. М.: Издательство Юрайт, 2015. 767 с.
- 59. Непша, Ф.С. Определение статических характеристик И регулирующих эффектов по напряжению асинхронных двигателей угольных шахт / Ф.С. Непша, В.М. Ефременко // материалы очно-заочного Международного научно-практического семинара «Актуальные проблемы автоматизации и энергосбережения в ТЭК России» (Нижневартовск, 6 апреля 2018 [электронный pecypc] / ФГБОУ BO «Нижневартовский г.) государственный университет»; редкол.: А.Ю. Ковалев (отв. ред.) [и др.]. – Нижневартовск: Изд-во Нижневарт. гос. ун-та, 2018. – C. 154 – 160.

- 60. Неуймин, В.Г. ПК «RastrWin3». Руководство пользователя / В.Г. Неуймин, Е.В. Машалов, А.С. Александров, А.А. Багрянцев. Екатеринбург: 2015. 276 с.
- 61. Непша, Ф.С. Оценка влияния на уровень потребления активной и реактивной мощности элементов СЭС угольной шахты, не участвующих в регулировании уровня напряжения / Ф.С. Непша, В.М. Ефременко // Омский научный вестник, 2017. № 5. С. 93–97.
- 62. Герасименко, А.А. Передача и распределение электрической энергии / Герасименко А.А., Федин В.Т. М.: КНОРУС, 2014. 648 с.
- 63. Губко, А. А. Электрооборудование и электроснабжение горных предприятий / А. А. Губко. Белово: Беловский полиграфист, 2008. 534 с.
- 64. ГОСТ 29322-2014 (IEC 60038:2009). Напряжения стандартные. Введ. 2015-10 -01. М.: Стандартинформ, 2015. 13 с.
- 65. Деннис, Д. Численные методы безусловной оптимизации и решения нелинейных уравнений / Д. Деннис, Р. Шнабель. М: Мир, 1988. 440 с.
- 66. Грунин, О.М. Математические задачи энергетики: учеб. пособие / О.М. Грунин, Л.В. Савицкий. Чита: ЗабГУ, 2014. 260 с.
- 67. Идельчик, В.И. Расчеты и оптимизация режимов электрических сетей и систем / В.И. Идельчик. М.: Энергоатомиздат, 1988 277 с.
- 68. Бартоломей, П.И. Повышение эффективности метода Ньютона при расчетах установившихся режимов больших электрических систем [Текст] / П.И. Бартоломей, С.К. Окуловский, А.В. Авраменко, А.А. Ярославцев // Электричество, 1982 №8.
- 69. Ортега, Д. Итерационные методы решения нелинейных систем уравнений со многими неизвестными / Д. Ортега, В. Рейнбольдт М.: Мир, 1975. 560 с.
- 70. Tinney, W.E. Power flow solution by Newton's method / W.E. Tinney, C.E. Hart // IEEE Trans. 1967. Vol. PAS-86. № 115 pp. 1449 1460.

- 71. Dharamjit, D.K. Load Flow Analysis on IEEE 30 bus System / D.K. Dharamjit // International Journal of Scientific and Research Publications, Volume 2, Issue 11, November 2012. pp. 61 70.
- 72. Матвеев, В.А. Метод приближенного решения систем нелинейных уравнений / В.А. Матвеев // Журнал вычислительной математики и математической физики, 1964. Том 4 №6. С. 983 994.
- 73. Степкин, А.М. Математические методы для анализа предельных режимов и выделения слабых звеньев электроэнергетических систем: дис. канд. техн. наук. Братский гос. университет, Братск, 2006 141 с.
- 74. Совалов, С.А. Режимы Единой энергосистемы / С.А. Совалов. М.: Энергоатомиздат, 1983 384 с.
- 75. Тарасов, В.И. Нелинейные методы минимизации для расчета установившихся режимов электроэнергетических систем / В.И. Тарасов. Новосибирск: Наука, 2001. 214 с.
- 76. Тарасов, В.И. Теоретические основы анализа установившихся режимов электроэнергетических систем / В.И. Тарасов. Новосибирск: Наука, 2002. 344 с.
- 77. Описание алгоритмов и моделей ПВК Mustang. Рига, 2001. 42 с.
- 78. Крумм, Л. А. Методы оптимизации при управлении электроэнергетическими системами / Л. А. Крумм. Новосибирск: Наука, 1981. 319 с.
- 79. Мурашко, Н.А. Анализ и управление установившимися состояниями электроэнергетических систем / Н.А. Мурашко, Ю.А. Охорзин, Л.А. Крумм и др. Новосибирск: Наука, 1987 239 с.
- 80. Меркурьев, Г.В. Устойчивость энергосистем. Монография / Г.В. Меркурьев, Ю.М. Шаргин СПб.: НОУ "Центр подготовки кадров энергетики", 2008. 300 с.
- 81. Van Ness, J. E. Elimination methods for load flow studies / J. E.Van Ness, J. H. Griffin // Power Apparatus and Systems, 1961.

- 82. Bhowmik, P. S. Load Flow Analysis: An Overview / P. S. Bhowmik, D.V. Rajan, S. P. Bose // World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering , vol. 6, 2012. − №3.
- 83. Dixit, S. Power flow analysis using fuzzy logic / S. Dixit, L. Srivastava, G. Agnihotri // in Proc. Power India Conference, IEEE, New Delhi, 2006.
- 84. Mohatram, M. Economic load flow using lagrange neural network / M. Mohatram, P. Tewari, N. Latanath // in Proc. Electronics, Communications and Photonics Conference (SIECPC), 2011 Saudi International, 2011 Apr.
- 85. Wallach, Y. Gradient methods for load flow-problems / Y. Wallach // IEEE Trans, Power App. Syst., vol. PAS-87, May 1968, pp. 1314 1318.
- 86. Brown, H. E. Contingencies evaluated by a Z-matrix method, IEEE Trans.Power App. Syst., vol. PAS-88, pp. 409 412, Apr. 1969.
- 87. Бартоломей, П.И. О методах второго порядка решения уравнений установившегося режима электрической системы / П.И. Бартоломей// Применение математических методов и вычислительной техники в энергосистемах. Свердловск: УПИД, 1986.
- 88. Nocedal, J. Numerical Optimization / J. Nocedal, S. J. Wright. Eds. Springer, 2006.
- 89. Измаилов, А.Ф. Численные методы оптимизации: Учеб. пособие. / А.Ф. Измаилов, М.В. Солодов. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. 304 с.
- 90. Schittkowski, K. NLQPL: A FORTRAN-Subroutine Solving Constrained Nonlinear Programming Problems, Annals of Operations Research, Vol. 5, pp 485 500, 1985.
- 91. Biggs, M.C. Constrained Minimization Using Recursive Quadratic Programming, Towards Global Optimization (L.C.W. Dixon and G.P. Szergo, eds.), North-Holland, pp 341 349, 1975.
- 92. Han, S.P. A Globally Convergent Method for Nonlinear Programming, J. Optimization Theory and Applications, Vol. 22, p. 297, 1977.

- 93. Powell, M.J.D. The Convergence of Variable Metric Methods for Nonlinearly Constrained Optimization Calculations, Nonlinear Programming 3, (O.L. Mangasarian, R.R. Meyer and S.M. Robinson, eds.), Academic Press, 1978.
- 94. Powell, M.J.D., A Fast Algorithm for Nonlinearly Constrained Optimization Calculations, Numerical Analysis, G.A.Watson ed., Lecture Notes in Mathematics, Springer Verlag, Vol. 630, 1978.
- 95. Fletcher, R. Practical Methods of Optimization, Vol. 1, Unconstrained Optimization, and Vol. 2, Constrained Optimization, John Wiley and Sons, 1980.
- 96. Gill, P.E. Practical Optimization / P.E. Gill, W. Murray, M.H.Wright // London, Academic Press, 1981.
- 97. Powell, M.J.D. Variable Metric Methods for Constrained Optimization, Mathematical Programming: The State of the Art, (A. Bachem, M. Grotschel and B. Korte, eds.) Springer Verlag, pp. 288 311, 1983.
- 98. Hock, W. Comparative Performance Evaluation of 27 Nonlinear Programming Codes / W. Hock, K. A. Schittkowski //, Computing, Vol. 30, p. 335, 1983.
- 99. Рейзлин, В.И. Численные методы оптимизации: учебное пособие / В.И. Рейзлин. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011 105 с.
- 100. Устройство регулирования напряжения трансформатора «Сириус-2-РН». Руководство по эксплуатации. БПВА.656122.043 РЭ./ ЗАО «РАДИУС Автоматика» Москва: 2016. 66 с.
- 101. Непша, Ф.С. Сравнение функциональных возможностей программных средств расчета и анализа электрических режимов / Ф.С. Непша, Г.В. Отдельнова, О.А. Савинкина // Вестн. Кузбасского гос. тех. унив., 2013. N 2. C. 116-118.
- 102. Железко, Ю. С. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии / Ю. С. Железко. М.: Энергоатомиздат, 1985. 224 с.

- 103. Статья «Центр Безопасности» / Журнал «Уголь Кузбасса». 2014. № 4. С. 18–20.
- 104. Система мониторинга добычи и обогащения угля. Решения на базе SCADA INFINITY // Компания ЭлеСи: промышленная автоматизация технологических процессов и производства. URL: http://elesy.ru/scada-infinity/solutions/mining/coal-mining-monitoring-system.aspx (дата обращения: 15.04.2018).
- 105. КТСВП Комплектная трансформаторная силовая взрывозащищенная подстанция. // Заводы-изготовители горно-шахтного оборудования ЗАО "EXC". URL: http://oaoex.ru/upload/docs/ktsvp-uhl5-vv-specifications.pdf (дата обращения: 15.04.2018).
- 106. Очистные комбайны для выемки угля длинными очистными забоями. // Восточная Техника, ООО, официальный дилер Caterpillar. URL:https://www.vost-tech.ru/files/catalog/Longwall/el.pdf (дата обращения: 15.04.2018).
- 107. Непша, Ф. С. Особенности регулирования уровня напряжения в системах электроснабжения угольных шахт Кузбасса / Ф.С. Непша, В.М. Ефременко // Промышленная энергетика, 2017. № 11. С. 116–118.
- 108. Непша, Ф.С. Оценка влияния работы устройства регулирования под нагрузкой на уровень потерь активной мощности в силовых трансформаторах / Ф.С. Непша, В.М. Ефременко // Вестн. Кузбасского гос. тех. унив., 2017. № 4. С. 84–89.
- 109. Nepsha, F. Definition of static voltage characteristics of the motor load for the purpose of increase in energy efficiency of coal mines of Kuzbass / Fedor Nepsha, Vladimir Efremenko // The Second International Innovative Mining Symposium. 2017. 2017. 10 pp. (https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2017/09/e3sconf\_2iims2017\_03004/e3sconf\_2iims2017\_03004.html).
- 110. Непша, Ф.С. Определение эквивалентных статических характеристик нагрузки в системе электроснабжения угольных шахт / Ф.С.

- Непша, В.М. Ефременко // Инновационный конвент "Кузбасс: образование, наука, инновации", Кемерово, 15.12.2017 г. [Текст]: материалы Инновационного конвента / Департамент молодежной политики и спорта Кемеровской области [и др.]; ред. кол.: В. В. Кашталап [и др.]. Кемерово, 2017. С. 66–69.
- Ф.С. Разработка 111. Непша, алгоритма оптимизации уровня напряжения в системе электроснабжения угольных шахт по критерию минимума потребления активной мощности / Ф.С. Непша, В.М. Ефременко // Сборник статей по материалам II Всероссийской молодежной научноконференция «Экологические проблемы практической промышленно развитых и ресурсодобывающих регионов: пути решения» (21-22 декабря 2017 г.) [электронный ресурс] / ФГБОУ ВО «Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т.Ф. Горбачева»; редкол.: С.Г. Костюк (отв. ред.) [и др.]. – Кемерово, 2017.
- 112. Непша, Ф.С. Оценка эффективности оптимального регулирования напряжения в системе электроснабжения угольной шахты / Ф.С. Непша, В.М. Ефременко // Вестн. Кузбасского гос. тех. унив., 2018.  $\mathbb{N}$  1. С. 149—157.
- 113. Непша, Ф.С. Особенности использования технических средств регулирования напряжения в системах электроснабжения угольных шахт Кузбасса / Ф.С. Непша, В.М. Ефременко // Сборник материалов X Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Россия молодая» (23-25 апреля 2018 г.), Кемерово [Электронный ресурс] / ФГБОУ ВО «Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева»; редкол.: С. Г. Костюк (отв. ред.) [и др.]. Кемерово, 2018.
- 114. Стариков, Б.Я. Асинхронный электропривод очистных комбайнов / Б.Я. Стариков, В.Л. Азарх, З.М. Рабинович. М: Недра, 1981. 288 с.
- 115. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018616064 (Программа для определения коэффициентов полиномов статических характеристик асинхронных двигателей по напряжению).

## Сведения о нагрузке передвижных участковых подстанций (ПУПП)

	Тип эл.		Техни	ческие ,	данны	е элект	родвига	телей					
Тип рабочей машины	двигателя на рабочей машине	$P_{_{\scriptscriptstyle H}},$ к $B$ т	$I_{_{\scriptscriptstyle{H}}}, \\ { m A}$	<i>I</i> <sub>n</sub> , A	$\frac{M_{\scriptscriptstyle n}}{M_{\scriptscriptstyle H}}$	$\frac{M_{\kappa}}{M_{_{H}}}$	$\cos \varphi$	кпд	$U_{_{\scriptscriptstyle H}}, \ \mathrm{B}$				
	Электро	прием	иники П	ІУПП-1	(1140	<b>B</b> )							
JOY 19DB440J 285 177 1237 1,8 2,1 0,89 93,5 1													
	JOY 10EB280J	60	37.5	262.5	2,2	2,4	0,85	92,3	950				
Комбайн 7LS20	JOY 6EB21OJ	13	8	56	2,2	2,4	0,84	92	1100				
71.520	JOY 19DB440J	285	177	1237	1,8	2,1	0,89	93,5	1100				
	JOY 10EB280J	60	37.5	262.5	2,2	2,4	0,85	92,3	950				
JOY 6EB21OJ 13 8 56 2,2 2,4 0,84 92 11													
Дробилка IT	EM43	235	144	576	2,1	2,3	0,92	94,0	1140				
Лебедка ЛПК-10Б	ВРП 180	22	13.4	94	2,2	2,3	0,92	92,0	1140				
Орошение	2ВРП225	55	34	221	2,0	2,5	0,88	93,0	1140				
Лебедка ЛМТ-150	ВРП 180	30	19	133	2,2	2,5	0,9	89,5	1140				
ТЭГ		0,8	0,5	4	2,2	2,6	0,89	0,9	1140				
Насос К-60	ВРП 160	15	10	60	2,0	2,1	0,89	89,5	1140				
	Электро	_	<sup>Р</sup> , =1074 иники <b>I</b>		2(1140)	<b>B</b> )							
Конвейер AFC	Бройер-						0.00	02.0	1140				
Двиг №1	Моторен	500	310	25	1,5	1,7	0,89	93,0	1140				
Конвейер AFC Двиг №2	Бройер- Моторен	500	310	25	1,5	1,7	0,89	93,0	1140				
Конвейер AFC Двиг №3	Бройер- Моторен	500	310	25	1,5	1,7	0,89	93,0	1140				
Перегружатель	Бройер- Моторен	500	310	25	1,5	1,7	0,89	93,0	1140				
		$\sum P$	$P_{_{H}} = 200$	0кВт									
	Электро	прием	<u>иники</u> І	<u> ІУПП</u> -3	3(1140)	B)							
Насосная станция hauhinco	BARTEK	400	280	1736	2,0	2,1	0,9	91,2	1140				
Насосная станция hauhinco	BARTEK	400	280	1736	2,0	2,1	0,9	91,2	1140				
Насосная станция hauhinco	BARTEK	400	280	1736	2,0	2,1	0,9	91,2	1140				
		$\sum P$	$P_{_{H}} = 1200$	0кВт									

	Электроприемники ПУПП-4(1140В)														
Приводная станция	BAO 315	315	192	1344	2,1	2,4	0,88	93,8	1140						
Приводная станция	BAO 315	315	192	1344	2,1	2,4	0,88	93,8	1140						
Приводная станция	BAO 315	315	192	1344	2,1	2,4	0,88	93,8	1140						
TЭΓ 0,75 0,5 4 2,2 2,6 0,89 0,9 114															
ТЭГ															
TЭΓ   0,75   0,5   4   2,2   2,6   0,89   0,9   1140															
$\sum P_{_{H}} = 947\kappa Bm$															
Электроприемники ПУПП-5(1140В)															
Приводная станция ВАО 315 315 192 1344 2,1 2,4 0,88 93,8 1140															
Приводная станция															
ТЭГ		0,75	0,5	4	2,2	2,6	0,89	0,9	1140						
ТЭГ		0,75	0,5	4	2,2	2,6	0,89	0,9	1140						
		$\sum P_{\scriptscriptstyle H}$	$_{u} = 631$	кВт											
	Электро	прием	ники ]	ТУПП-	6(660E	<u>B)</u>									
Натяжная станция		55	60,5	270	2,0	2,1	0,9	92	660						
Hacoc		0,75	0,8	4	2,2	2,6	0,89	0,9	660						
		$\sum P$	$_{_{H}}=56n$	кВт											

### Графическое представление схемы замещение в ПВК RastrWin3

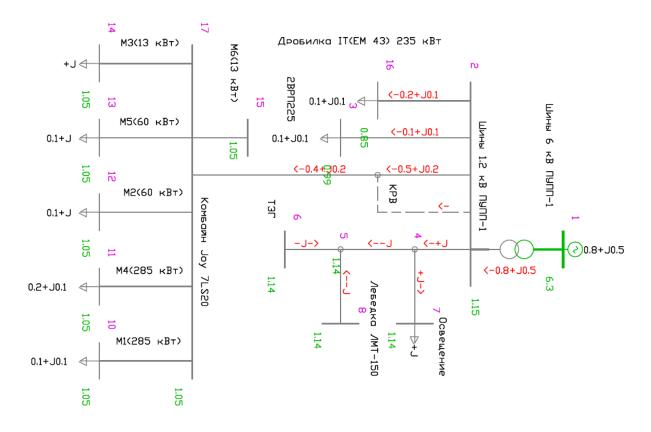


Рисунок П.1.1 – Модель сети ПУПП №1

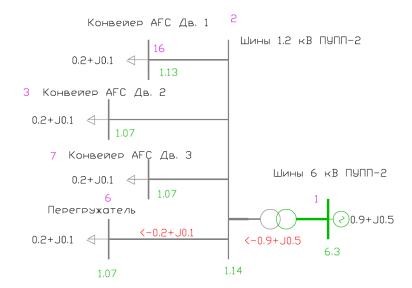


Рисунок П.1.2 – Модель сети ПУПП №2

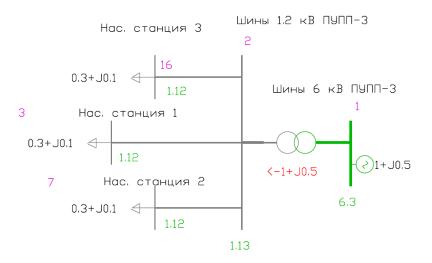


Рисунок П.1.3 – Модель сети ПУПП №3

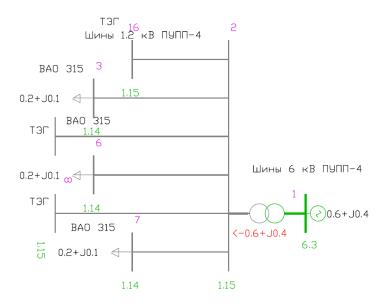


Рисунок П.1.4 – Модель сети ПУПП №4

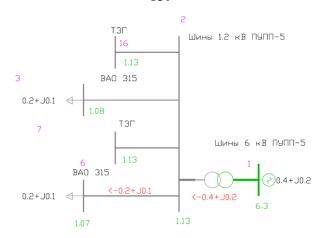


Рисунок П.1.5 – Модель сети ПУПП №5

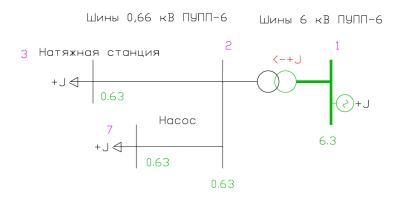


Рисунок П.1.6 – Модель сети ПУПП №6

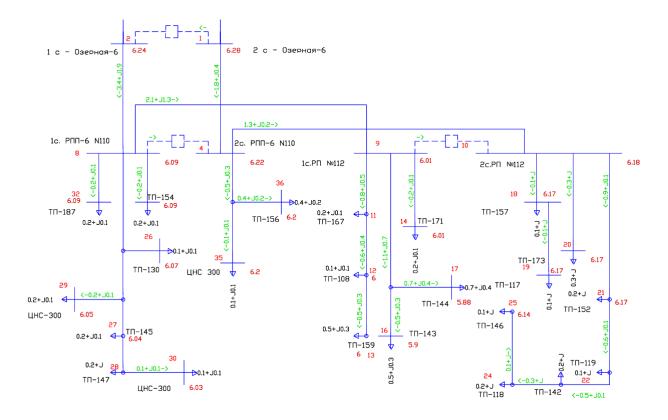


Рисунок П.1.7 – Модель СЭС угольной шахты

# Формирование матриц узлов, ветвей, статических характеристик нагрузки по напряжению и проводимостей

Любая схема электрической сети может быть представлена в виде матриц и графов. Подобная запись существенно упрощает запись и решение уравнений установившегося режима (УУР).

Пример схемы электрической сети представлен на рисунке П2.1. На схеме обозначены номера узлов и ветвей (выделено жирным шрифтом).

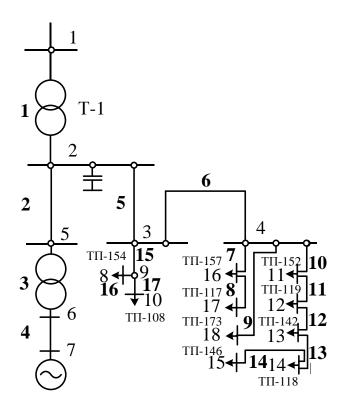


Рисунок П2.1 – Пример схемы электрической сети

Для формирования расчетной модели представленной схемы формируются таблицы (матрицы) с исходными данными о параметрах узлов (таблица П2.1), ветвей (таблица П2.2) и статических характеристик по напряжению для узлов нагрузки (таблица П2.3).

Таблица П2.1 – Параметры ветвей

No	№нач	№кон	Тип	Цеорогии	R,	X,	G,	В,	Nанц	БД_анц	$\nu^{-1}$
Ветви	л∘нач	Nokoh	ветви	Название	Ом	Ом	мкСм	мкСм			$\mathbf{\Lambda}_{\mathrm{Tp}}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1	2	Тр-р	T-1	0,35	5,57	73,46	9,8	10	1	0,18
2	2	5	ЛЭП	Ф. 1-1	0,25	0,09	-	-			-

 $<sup>^{1}</sup>$ Коэффициент трансформации определяется параметрами УРПН

Таблица П2.2 – Параметры узлов

№	Название	Тип узла*	Uн ом, кВ	G, , мкС м	В, мкСм	<sup>3</sup> № CXH	Рн, МВ т	Qн, МВт	Рг, МВт	Qmin, MBAp	Qmax, MBAp	V3, кВ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	1 с. 35 кВ	База	35									35,2
2	1 с. 6 кВ	Нагр	6		-7558							
3	1 с. РПП №110	Нагр	6									
4	1 с. РПП №112	Нагр	6									
5	1 с. 6 кВ СМ	Нагр	6									
6	1 с. 0,4 кВ СМ	Нагр	0,4									
7	CM-1	Ген	0,4						0,5	0	0,7	0,4
8	ТП-154	Нагр	6			1	0,2	0,1				
N												

 $<sup>^{1}</sup>$ описание типов узлов приведено в Приложении 3.  $^{2}N$  — число узлов в схеме.

Таблица П2.3 – Параметры статических характеристик нагрузки\*

№	Vmin	$a_0(A_0)$	$a_1(A_1)$	$A_2$	$b_0(B_0)$	$b_1(B_1)$	$B_2$
1	2	3	4	5	6	7	8
1	5,4	0,050	-0,132	0,882	3,92	-6,19	3,07

<sup>\*</sup>коэффициенты полиномов определяются по алгоритмам описанным в главе 2.

После ввода исходных данных о параметрах узлов, ветвей нагрузки напряжению статических характеристиках ПО выполняется формирование матрицы узловых проводимостей. Формирование матрицы узловых проводимостей включает 2 этапа:

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>Для узлов без нагрузки СХН не задается.

### I – этап. Расчет параметров моделей элементов сети.

1. *Ветвь «ЛЭП»*. Данной ветвью представляются модели воздушных и кабельных линий. Схема замещения ветви «ЛЭП» представлена на рисунке П2.1.

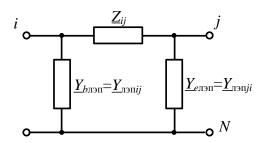


Рисунок П2.2— Схема замещения ветви типа «ЛЭП»

Определяется собственная проводимость ветви:

$$\underline{Y_{ij}} = -\frac{1}{\underline{Z}_{ij}},\tag{\Pi2.1}$$

где  $\underline{Z}_{ij} = r_{ij} + j \cdot x_{ij};$   $\underline{Z}_{ij}, r_{ij}, x_{ij}$  полное, активное и индуктивное сопротивления ветви i - j (Ом),

Определяется активная и емкостная проводимость ЛЭП в начале и конце ветви:

$$\underline{Y}_{b \to n = \underline{Y}_{e \to n = \underline{I}}} = \underline{Y}_{n \to n i, j} = \underline{Y}_{n \to n j, i} = \frac{G_{ij} + j \cdot B_{ij}}{2}, \tag{\Pi2.2}$$

где  $G_{ij}$ ,  $B_{ij}$  — активная и емкостная проводимости ветви  $i\!-\!j$  (мкСм),  $\underline{Y}_{b\pi\pi}$ ,  $\underline{Y}_{e\pi\pi}$  — полные проводимости начала и конца ветви типа «ЛЭП» (мкСм)

2. *Ветвы «Тр-р»*. Данной ветвыю моделируются силовые трансформаторы. Схема замещения ветви «Тр-р» представлена на рисунке ПЗ.3.

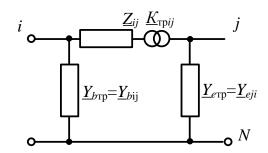


Рисунок П2.3 – схема замещения ветви типа «Тр-р»

Определяется собственная проводимость ветви:

$$\underline{Y_{ij}} = \frac{-1}{\underline{K}_{mpij} \cdot \underline{Z}_{ij}},\tag{\Pi2.3}$$

где  $\underline{K}_{\it mpij}$  — коэффициент трансформации силового трансформатора. При этом если  $U_{\it homj}{\ge}U_{\it homj}$ , то  $\left|\underline{K}_{\it mpij}\right|{\le}1$ .

Определяется активная и индуктивная проводимость трансформаторной ветви:

в начале ветви

$$\underline{\underline{Y}}_{brp} = \frac{\left(1 - \frac{1}{\underline{\underline{K}}_{rpij}}\right)}{\underline{\underline{Z}}_{ij}} + \underline{\underline{Y}}_{\mu ij}, \tag{\Pi2.4}$$

где  $\underline{Y}_{\mu ij} = G_{ij} + j \cdot B_{ij}$  полная проводимость цепи намагничивания транформатора.

- в конце ветви

$$\underline{\underline{Y}}_{e \text{Tp}} = \frac{\left(\frac{1}{\underline{K}_{\text{Tp}ij}} - 1\right) \cdot \frac{1}{\underline{K}_{\text{Tp}ij}}}{\underline{Z}_{ii}},\tag{\Pi2.5}$$

3. *Ветвь «Выкл»*. Данной ветвью задаются выключатели. Схема замещения ветви «Тр-р» представлена на рисунке П2.4.

$$i \circ \qquad \qquad \stackrel{R_{ij}}{\bigcirc} \qquad \stackrel{j}{\circ}$$

Рисунок П2.4 – схема замещения ветви типа «Выкл»

Собственная проводимость ветви определяется по формуле:

$$\underline{Y_{ij}} = \frac{1}{\underline{R}_{ij}}, \text{ где } \underline{R}_{ij} = 0,01 \text{ Ом}$$
 (П2.6)

При этом проводимости в начале и конце ветви отсутствуют.

## 2 – этап. Непосредственное формирование матрицы узловых проводимостей.

Число строк и столбцов матрицы равно количеству узлов в схеме (N).

Параметры недиагональных элементов матрицы принимаются равными значениям, определенным по формулам (П2.1), (П2.3), (П2.6). При этом значения i,j являются номерами строки и столбца матрицы соответственно.

Параметры диагональных элементов матрицы определяются по формуле:

$$\underline{Y_{ii}} = -\sum_{j=1}^{N} \underline{Y}_{i,j} + \sum_{j=1}^{N} \underline{Y}_{b\tau pi,j} + \sum_{j=1}^{N} \underline{Y}_{e\tau pi,j} - \sum_{j=1}^{N} \underline{Y}_{\pi ni,j} - (G_i + j \cdot B_i) \cdot 10^{-6}, \qquad (\Pi 2.7)$$

где n — суммарное число узлов в схеме,  $G_i$ ,  $B_i$  — активная и реактивная проводимость i-го узла (мкСм).

## Описание метода Ньютона с определением коэффициента демпфирования по схеме Энеева-Матвеева

Метод Ньютона с определением коэффициента демпфирования по схеме Энеева-Матвеева включает в себя выполнение следующих этапов:

- 1. Задание начальных значений неизвестных напряжений  $U^{(0)},\; \delta^{(0)}\;. \quad \text{В качестве начальных приближений принимаются:}$   $U^{(0)} = U_{_{HOM}},\; \delta^{(0)} = 0 \;\text{, т.е. номинальные напряжения узлов.}$
- 2. Задание условий расчета: точность  $\varepsilon$  (кВт), предельное количество итераций  $n_{np}$  и, при необходимости, прочие параметры (максимально и минимально допустимое снижение напряжения).
- 3. Формирование уравнений небалансов активной  $\varepsilon_{p_i}$  и реактивной  $\varepsilon_{o_i}$  мощности в узлах, используя матрицы проводимостей и матрицы узлов:

$$\varepsilon_{Pi} = -P_{\text{\tiny \textit{Hazpi}}}(U_i) + P_{\text{\tiny \textit{Zeni}}} - U_i^2 Y_{i,i} \cdot \cos(\theta_{i,i}) - U_i \cdot \sum_{\substack{j \in A_i \\ j \neq i}}^N U_j \cdot Y_{i,j} \cdot \cos(\theta_{i,j} + \delta_i - \delta_j) = 0, \ i \in \overline{1,N}; \quad (\Pi 3.1)$$

$$\varepsilon_{\mathit{Qi}} = -Q_{\mathit{nazpi}}(U_{i}) + Q_{\mathit{zeni}} - U_{i}^{2}Y_{i,i} \cdot \sin(\theta_{i,i}) - U_{i} \cdot \sum_{\substack{j \in A_{i} \\ j \neq i}}^{N} U_{j} \cdot Y_{i,j} \cdot \sin(\theta_{i,j} + \delta_{i} - \delta_{j}) = 0, \ i \in \overline{1, N_{\mathit{naz}}}; \quad (\Pi 3.2)$$

где  $P_{\text{нагрi}}(U_i)$ ,  $Q_{\text{нагрi}}(U_i)$  — нагрузка i-ого узла, заданная статическими характеристиками нагрузки по напряжению;  $U_i$  — напряжение в i-ом узле (кВ);  $Y_{i,i}$ ,  $\theta_{i,i}$  — модуль и фаза собственной проводимости i-го узла;  $Y_{i,j}$ ,  $\theta_{i,j}$  — модуль и фаза проводимостей ветви сопряженной с i-ым узлом;  $\delta_i$ ,  $\delta_j$  — фаза напряжения в i-ом и j-ом узле, N — суммарное число узлов в схеме;  $N_{\text{нагр}}$  — число нагрузочных узлов;  $A_i$  — множество ветвей сопряженных с i-ым узлом;  $P_{\text{нагрi}}(U_i)$ ,  $Q_{\text{нагрi}}(U_i)$  характеризуют значения нагрузки в узлах, обновляемые на каждой итерации в зависимости от напряжения  $U_i$ .

Уравнения небаланса  $\varepsilon_{Pi}$  составляются для всех узлов, кроме балансирующего. Уравнения небаланса  $\varepsilon_{Qi}$  составляются для узлов типа «Нагрузка» и узлов PQmax, PQmin — типа. По способу задания исходных данных различают 5 типов узлов:

Дано	Найти	Тип
$P_{i,} Q_{i}$	$U_{i,}\delta_{i}$	Нагрузка, $PQ$ — тип
$V_{i,}  \delta_i$	$P_{i,} Q_{i}$	Балансирующий, $U\delta$ – тип
$P_i$ $U_i$	$Q_i$ $\delta_i$	Идеальный генератор, $PU$ – тип

Идеальный генератор, РОтах – тип

Идеальный генератор, *PQ*min – тип

 $U_i \delta_i$ 

 $U_{i.} \, \delta_i$ 

 $P_i, Q_i$ 

Таблица ПЗ.1 – Типы узлов

Уравнения небаланса (П3.1-П3.2) не формируются для узлов  $U\delta$  – типа, для узлов PU-типа не формируются уравнения (П3.2). При этом при наличии ограничений по реактивной мощности, узел PU – типа может изменить свой тип на  $PQ_{max}$  или  $PQ_{min}$ . В таком случае уравнение небаланса (П3.2) формируется.

4. Формирование матрицы Якоби (П3.3). Матрица Якоби представляет собой симметричную, квадратную матрицу с размерностью 2Nx2N. Она включает в себя частные производные от уравнений небаланса по всем неизвестным.

DOBINANCE HOUSECH HEUSECTHEIM.

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \mathcal{E}_{q1}}{\partial U_1} & \frac{\partial \mathcal{E}_{q1}}{\partial \delta_1} & \frac{\partial \mathcal{E}_{q1}}{\partial U_2} & \frac{\partial \mathcal{E}_{q1}}{\partial \delta_2} & \frac{\partial \mathcal{E}_{q1}}{\partial U_n} & \frac{\partial \mathcal{E}_{q1}}{\partial \delta_n} \\ \frac{\partial \mathcal{E}_{p1}}{\partial U_1} & \frac{\partial \mathcal{E}_{p1}}{\partial \delta_1} & \frac{\partial \mathcal{E}_{p1}}{\partial U_2} & \frac{\partial \mathcal{E}_{p1}}{\partial \delta_2} & \frac{\partial \mathcal{E}_{p1}}{\partial U_n} & \frac{\partial \mathcal{E}_{p1}}{\partial \delta_n} \\ \frac{\partial \mathcal{E}_{q2}}{\partial U_1} & \frac{\partial \mathcal{E}_{q3}}{\partial \delta_1} & \frac{\partial \mathcal{E}_{q2}}{\partial U_2} & \frac{\partial \mathcal{E}_{q2}}{\partial \delta_2} & \frac{\partial \mathcal{E}_{q2}}{\partial U_n} & \frac{\partial \mathcal{E}_{q2}}{\partial \delta_n} \\ \frac{\partial \mathcal{E}_{p2}}{\partial U_1} & \frac{\partial \mathcal{E}_{p3}}{\partial \delta_1} & \frac{\partial \mathcal{E}_{p2}}{\partial U_2} & \frac{\partial \mathcal{E}_{p2}}{\partial \delta_2} & \frac{\partial \mathcal{E}_{p2}}{\partial U_n} & \frac{\partial \mathcal{E}_{p2}}{\partial \delta_n} \\ \frac{\partial \mathcal{E}_{p2}}{\partial U_1} & \frac{\partial \mathcal{E}_{qn}}{\partial \delta_1} & \frac{\partial \mathcal{E}_{qn}}{\partial U_2} & \frac{\partial \mathcal{E}_{qn}}{\partial \delta_2} & \frac{\partial \mathcal{E}_{qn}}{\partial U_n} & \frac{\partial \mathcal{E}_{qn}}{\partial \delta_n} \\ \frac{\partial \mathcal{E}_{qn}}{\partial U_1} & \frac{\partial \mathcal{E}_{qn}}{\partial \delta_1} & \frac{\partial \mathcal{E}_{qn}}{\partial U_2} & \frac{\partial \mathcal{E}_{pn}}{\partial \delta_2} & \frac{\partial \mathcal{E}_{pn}}{\partial U_n} & \frac{\partial \mathcal{E}_{qn}}{\partial \delta_n} \\ \frac{\partial \mathcal{E}_{pn}}{\partial U_1} & \frac{\partial \mathcal{E}_{pn}}{\partial \delta_1} & \frac{\partial \mathcal{E}_{pn}}{\partial U_2} & \frac{\partial \mathcal{E}_{pn}}{\partial \delta_2} & \frac{\partial \mathcal{E}_{pn}}{\partial U_n} & \frac{\partial \mathcal{E}_{pn}}{\partial \delta_n} \\ \frac{\partial \mathcal{E}_{pn}}{\partial U_1} & \frac{\partial \mathcal{E}_{pn}}{\partial \delta_1} & \frac{\partial \mathcal{E}_{pn}}{\partial U_2} & \frac{\partial \mathcal{E}_{pn}}{\partial \delta_2} & \frac{\partial \mathcal{E}_{pn}}{\partial U_n} & \frac{\partial \mathcal{E}_{pn}}{\partial \delta_n} \\ \frac{\partial \mathcal{E}_{pn}}{\partial U_1} & \frac{\partial \mathcal{E}_{pn}}{\partial \delta_1} & \frac{\partial \mathcal{E}_{pn}}{\partial U_2} & \frac{\partial \mathcal{E}_{pn}}{\partial \delta_2} & \frac{\partial \mathcal{E}_{pn}}{\partial U_n} & \frac{\partial \mathcal{E}_{pn}}{\partial \delta_n} \\ \frac{\partial \mathcal{E}_{pn}}{\partial U_1} & \frac{\partial \mathcal{E}_{pn}}{\partial \delta_1} & \frac{\partial \mathcal{E}_{pn}}{\partial U_2} & \frac{\partial \mathcal{E}_{pn}}{\partial \delta_2} & \frac{\partial \mathcal{E}_{pn}}{\partial U_n} & \frac{\partial \mathcal{E}_{pn}}{\partial \delta_n} \\ \frac{\partial \mathcal{E}_{pn}}{\partial U_1} & \frac{\partial \mathcal{E}_{pn}}{\partial \delta_1} & \frac{\partial \mathcal{E}_{pn}}{\partial U_2} & \frac{\partial \mathcal{E}_{pn}}{\partial \delta_2} & \frac{\partial \mathcal{E}_{pn}}{\partial U_n} & \frac{\partial \mathcal{E}_{pn}}{\partial \delta_n} \\ \frac{\partial \mathcal{E}_{pn}}{\partial U_1} & \frac{\partial \mathcal{E}_{pn}}{\partial \delta_1} & \frac{\partial \mathcal{E}_{pn}}{\partial U_2} & \frac{\partial \mathcal{E}_{pn}}{\partial \delta_2} & \frac{\partial \mathcal{E}_{pn}}{\partial U_n} & \frac{\partial \mathcal{E}_{pn}}{\partial \delta_n} \\ \frac{\partial \mathcal{E}_{pn}}{\partial U_1} & \frac{\partial \mathcal{E}_{pn}}{\partial U_2} & \frac{\partial \mathcal{E}_{pn}}{\partial U$$

Элементы матрицы Якоби (ПЗ.3) определяются по формулам:

$$\begin{split} &\frac{\partial \mathcal{E}_{pi}}{\partial U_{i}} = -2U_{i} \, g_{ii} - \sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{n\Sigma} U_{j} \Big[ g_{ij} \cos \left( \delta_{i} - \delta_{j} \right) - b_{ij} \sin \left( \delta_{i} - \delta_{j} \right) \Big] \\ &\frac{\partial \mathcal{E}_{pi}}{\partial U_{j}} = -U_{i} \Big[ g_{ij} \cos \left( \delta_{i} - \delta_{j} \right) + b_{ij} \sin \left( \delta_{i} - \delta_{j} \right) \Big] \\ &\frac{\partial \mathcal{E}_{qi}}{\partial U_{i}} = -2U_{i} \, b_{ii} + \sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{n\Sigma} U_{j} \Big[ g_{ij} \sin \left( \delta_{i} - \delta_{j} \right) - b_{ij} \cos \left( \delta_{i} - \delta_{j} \right) \Big] \\ &\frac{\partial \mathcal{E}_{qi}}{\partial U_{j}} = U_{j} \Big[ g_{ij} \sin \left( \delta_{i} - \delta_{j} \right) - b_{ij} \cos \left( \delta_{i} - \delta_{j} \right) \Big] \\ &\frac{\partial \mathcal{E}_{pi}}{\partial \delta_{i}} = U_{i} \sum_{\substack{j=1\\j\neq k}}^{n\Sigma} U_{j} \Big[ g_{ij} \sin \left( \delta_{i} - \delta_{j} \right) + b_{ij} \cos \left( \delta_{i} - \delta_{j} \right) \Big] \\ &\frac{\partial \mathcal{E}_{qi}}{\partial \delta_{i}} = U_{i} \sum_{\substack{j=1\\j\neq k}}^{n\Sigma} U_{j} \Big[ b_{ij} \sin \left( \delta_{i} - \delta_{j} \right) + g_{ij} \cos \left( \delta_{i} - \delta_{j} \right) \Big] \\ &\frac{\partial \mathcal{E}_{pi}}{\partial \delta_{j}} = -U_{i} U_{j} \Big[ g_{ij} \sin \left( \delta_{i} - \delta_{j} \right) + b_{ij} \cos \left( \delta_{i} - \delta_{j} \right) \Big] \\ &\frac{\partial \mathcal{E}_{qi}}{\partial \delta_{j}} = U_{i} U_{j} \Big[ b_{ij} \sin \left( \delta_{i} - \delta_{j} \right) + g_{ij} \cos \left( \delta_{i} - \delta_{j} \right) \Big] \\ &\frac{\partial \mathcal{E}_{qi}}{\partial \delta_{j}} = U_{i} U_{j} \Big[ b_{ij} \sin \left( \delta_{i} - \delta_{j} \right) + g_{ij} \cos \left( \delta_{i} - \delta_{j} \right) \Big] \end{aligned}$$

Если узлы i и j не имеют связи между собой, то соответствующие производные в матрице Якоби, расположенные вне диагонали, будут равны нулю т.к. в соответствующих формулах (ПЗ.4) взаимная активная и реактивная проводимость  $g_{ij}$ ,  $b_{ij}$  является сомножителем и  $g_{ij}$ ,  $b_{ij}$  =0.

Наличие в схеме моделируемой сети особых узлов (опорные и балансирующие узлы) сказывается на структуре системы уравнений установившегося режима (ПЗ.1 – ПЗ.2) и матрицы Якоби:

- $\partial$ ля узлов PU-типа из матрицы Якоби исключается строка производных  $\frac{\partial \varepsilon_{Qi}}{\partial \delta_j}, \frac{\partial \varepsilon_{Qi}}{\partial U_j}$  (т.к. значение Q не задано, уравнение небаланса по реактивной мощности (ПЗ.2) не может быть составлено) и столбец производных  $\frac{\partial \varepsilon_{Qj}}{\partial \delta_i}, \frac{\partial \varepsilon_{Qj}}{\partial U_i}$  (т.к. модуль напряжения  $U_i$  известен, он исключается из состава неизвестных).
  - *для узлов PQ-типа* все элементы матрицы Якоби сохраняются.

- для узлов Vд-типа (базисный узел) из матрицы Якоби исключаются строки производных  $\frac{\partial \varepsilon_{p_i}}{\partial \delta_j}, \frac{\partial \varepsilon_{p_i}}{\partial U_j}, \frac{\partial \varepsilon_{\varrho_i}}{\partial \delta_j}, \frac{\partial \varepsilon_{\varrho_i}}{\partial U_j}$  (т.к. значения  $P_i, Q_i$  не заданы, то и уравнение баланса реактивной мощности (ПЗ.1) составить нельзя) и столбец производных  $\frac{\partial \varepsilon_{p_j}}{\partial \delta_i}, \frac{\partial \varepsilon_{\varrho_j}}{\partial U_i}, \frac{\partial \varepsilon_{\varrho_j}}{\partial \delta_i}, \frac{\partial \varepsilon_{\varrho_j}}{\partial U_i}$  (т.к. модуль напряжения  $U_i$  и угол  $\delta_i$  известен и он исключается из состава неизвестных).
- если узлы не связаны непосредственно соответствующие производные в матрице равны нулю.

Матрицу Якоби можно разбить на четыре блока:

 $\frac{\partial \varepsilon_{P}}{\partial \delta}$  — производные от уравнений небаланса активной мощности (ПЗ.1) по углам напряжений;

 $\frac{\partial \mathcal{E}_{p}}{\partial U}$  — производные от уравнений небаланса активной мощности по модулям напряжений;

 $\frac{\partial \varepsilon_{\varrho}}{\partial \delta}$  — производные от уравнений небаланса реактивной мощности (ПЗ.2) по углам напряжений;

 $\frac{\partial \varepsilon_Q}{\partial U}$  — производные от уравнений небаланса реактивной мощности по модулям напряжений.

5. Решение линеаризованной системы уравнений (ПЗ.5) и определение поправок к неизвестным  $\Delta \delta, \Delta U$  :

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \varepsilon_{Q}}{\partial U} & \frac{\partial \varepsilon_{Q}}{\partial \delta} \\ \frac{\partial \varepsilon_{P}}{\partial U} & \frac{\partial \varepsilon_{P}}{\partial \delta} \end{bmatrix}^{(k)} \times \begin{bmatrix} \Delta U \\ \Delta \delta \end{bmatrix}^{(k)} = -\begin{bmatrix} \varepsilon_{Q} \\ \varepsilon_{P} \end{bmatrix}^{(k)}$$
(II3.5)

Итерационный процесс метода Ньютона при введении корректирующего коэффициента длины шага записывается следующим образом:

$$X^{(k+1)} = X^{(k)} - \lambda^{(k)} \cdot \left[ \frac{\partial F}{\partial X} \cdot (X^{(k)}) \right]^{-1} \cdot F(X^{(k)})$$
 (II3.6)

где  $X^{(k)}$ ,  $X^{(k+1)}$ — векторы неизвестных на k-ой и (k+1)-ой итерациях, F— нелинейная вектор-функция УУР;  $\frac{\partial F}{\partial X}\cdot(X^{(k)})$ — матрица Якоби УУР;  $\lambda^{(k)}$ — корректирующий коэффициент длины шага метода Ньютона.

С использованием схемы Энеева-Матвеева, величина шага  $\lambda^{(k)}$  выбирается следующим образом:

$$\lambda^{k} = \begin{cases} 1/B^{k}, & B^{k} > 1\\ 1, & B^{k} \le 1 \end{cases}$$
 (II3.7)

$$B_{l}^{k} = \frac{1}{2 \cdot \max \left| F \left[ X^{(k)} \right] \right|} \cdot \max \left| \sum_{(i)} \sum_{(j)} \frac{\partial^{2} f_{i} \left[ X^{(k)} \right]}{\partial x_{i} \partial x_{j}} \Delta x_{j}^{(k)} \Delta x_{i}^{(k)} \right| \tag{\Pi3.8}$$

где  $\max \left| F[X^{(K)}] \right|$  — модуль максимального небаланса;  $\Delta x_j^{(k)} \Delta x_i^{(k)}$  — i,j компоненты вектора поправок,  $\frac{\partial^2 f_i \left[ X^{(k)} \right]}{\partial x_i \partial x_j}$  — элемент матрицы Гессе, l-номер соответствующего уравнения небаланса  $\mathcal{E}_{Pi}$  ,  $\mathcal{E}_{Qi}$  .

Выражение (ПЗ.8) также может быть записано в матричной форме:

$$B^{k}_{l} = \frac{1}{2 \cdot \max \left| F \left[ X^{(k)} \right] \right|} \cdot \left\| \left[ \Delta X^{(k)} \right]^{T} \cdot \Gamma_{l} \cdot \Delta X^{(k)} \right\|_{m} \tag{II3.9}$$

где  $\Gamma_{i}$ - матрица  $\Gamma$ ессе от функции  $f_{i}\left(x\right)$ , вычисленная в точке  $X^{(k)}$ .

 $\left\| \left[ \Delta X^{(k)} \right]^T \cdot \Gamma_i \cdot \Delta X^{(k)} \right\|_m - m$ -норма матрицы, равна наибольшей сумме модулей элементов строки.

Второй сомножитель для  $B^k$  представляет собой максимальный по модулю элемент вектора, полученного в результате умножения матрицы вторых производных вектор-функции F(X) на компоненты вектора поправок  $\Delta X^{(k)}$ .

В случае с решением уравнений установившегося режима, матрица Гессе будет выглядеть следующим образом:

$$\Gamma_{i} = \begin{bmatrix}
\frac{\partial^{2} f_{i}}{\partial U_{1} \partial U_{1}} & \cdots & \frac{\partial^{2} f_{i}}{\partial U_{1} \partial U_{n}} & \frac{\partial^{2} f_{i}}{\partial U_{1} \partial \delta_{1}} & \cdots & \frac{\partial^{2} f_{i}}{\partial U_{1} \partial \delta_{n}} \\
\cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\
\frac{\partial^{2} f_{i}}{\partial U_{n} \partial U_{1}} & \cdots & \frac{\partial^{2} f_{i}}{\partial U_{n} \partial U_{n}} & \frac{\partial^{2} f_{i}}{\partial U_{n} \partial \delta_{1}} & \cdots & \frac{\partial^{2} f_{i}}{\partial U_{n} \partial \delta_{n}} \\
\frac{\partial^{2} f_{i}}{\partial \delta_{1} \partial U_{1}} & \cdots & \frac{\partial^{2} f_{i}}{\partial \delta_{1} \partial U_{n}} & \frac{\partial^{2} f_{i}}{\partial \delta_{1} \partial \delta_{1}} & \cdots & \frac{\partial^{2} f_{i}}{\partial \delta_{1} \partial \delta_{n}} \\
\cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\
\frac{\partial^{2} f_{i}}{\partial \delta_{n} \partial U_{1}} & \cdots & \frac{\partial^{2} f_{i}}{\partial \delta_{n} \partial U_{n}} & \frac{\partial^{2} f_{i}}{\partial \delta_{n} \partial \delta_{1}} & \cdots & \frac{\partial^{2} f_{i}}{\partial \delta_{n} \partial \delta_{n}}
\end{bmatrix}$$
(II3.10)

где  $f_i$  – i-ое уравнение баланса активных (реактивных) мощностей  $\varepsilon_{p_i}$ ,  $\varepsilon_{Q_i}$ ; n-число узловых точек схемы замещения ЭЭС.

Элементы матрицы Гессе определяются путем определения двойных производных от уравнений небаланса (ПЗ.1-ПЗ.2).

Для уравнений небаланса по активной мощности элементы определяются следующим образом:

$$\frac{\partial^{2} f_{i}^{P}}{\partial U_{i} \partial U_{i}} = -2 \cdot y_{i,i} \cdot \cos(\theta_{i,i});$$

$$\frac{\partial^{2} f_{i}^{P}}{\partial U_{i} \partial U_{j}} = \frac{\partial^{2} f_{i}^{P}}{\partial U_{j} \partial U_{i}} = -y_{i,j} \cdot \cos(\theta_{i,j} + \delta_{i} - \delta_{j});$$

$$\frac{\partial^{2} f_{i}^{P}}{\partial U_{i} \partial \delta_{i}} = \frac{\partial^{2} f_{i}^{P}}{\partial \delta_{i} \partial U_{i}} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n\Sigma} U_{j} \cdot y_{i,j} \cdot \sin(\theta_{i,j} + \delta_{i} - \delta_{j});$$

$$\frac{\partial^{2} f_{i}^{P}}{\partial U_{i} \partial \delta_{j}} = \frac{\partial^{2} f_{i}^{P}}{\partial \delta_{j} \partial U_{i}} = -U_{j} \cdot y_{i,j} \cdot \sin(\theta_{i,j} + \delta_{i} - \delta_{j});$$

$$\frac{\partial^{2} f_{i}^{P}}{\partial U_{j} \partial \delta_{i}} = \frac{\partial^{2} f_{i}^{P}}{\partial \delta_{i} \partial U_{j}} = U_{i} \cdot y_{i,j} \cdot \sin(\theta_{i,j} + \delta_{i} - \delta_{j});$$

$$\frac{\partial^{2} f_{i}^{P}}{\partial \delta_{i} \partial \delta_{i}} = U_{i} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n\Sigma} U_{j} \cdot y_{i,j} \cdot \cos(\theta_{i,j} + \delta_{i} - \delta_{j});$$

$$\frac{\partial^{2} f_{i}^{P}}{\partial \delta_{i} \partial \delta_{j}} = \frac{\partial^{2} f_{i}^{P}}{\partial \delta_{j} \partial \delta_{i}} = -U_{i} \cdot U_{j} \cdot y_{i,j} \cdot \cos(\theta_{i,j} + \delta_{i} - \delta_{j});$$

$$\frac{\partial^{2} f_{i}^{P}}{\partial \delta_{i} \partial \delta_{j}} = \frac{\partial^{2} f_{i}^{P}}{\partial \delta_{j} \partial \delta_{i}} = -U_{i} \cdot U_{j} \cdot y_{i,j} \cdot \cos(\theta_{i,j} + \delta_{i} - \delta_{j});$$

Производные вида,  $\frac{\partial^2 f_i^P}{\partial \delta_j \partial \delta_j}$ ,  $\frac{\partial^2 f_i^P}{\partial \delta_j \partial \delta_k}$ ,  $\frac{\partial^2 f_i^P}{\partial \delta_j \partial \delta_j}$ ,  $\frac{\partial^2 f_i^P}{\partial \delta_j \partial \delta_j}$  равны нулю.

По итогам расчета формируется матрица корректирующего коэффициента длины шага  $\lambda^{(k)}$  для каждой неизвестной переменной  $U_i$  и  $\delta_i$ .

Далее определяются очередные приближения неизвестных  $\delta^{(k+1)}, U^{(k+1)}$  в соответствии с (ПЗ.12) с учетом  $\lambda^{(k)}$ ;

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ \delta_1 \\ U_2 \\ \delta_2 \\ U_n \\ \delta_n \end{bmatrix}^{(k+1)} = \begin{bmatrix} U_1 \\ \delta_1 \\ U_2 \\ \delta_2 \\ U_n \\ \delta_n \end{bmatrix}^{(k)} + \begin{bmatrix} \lambda_{Q1} \\ \lambda_{P1} \\ \lambda_{Q2} \\ \lambda_{Q2} \\ \lambda_{Q2} \\ \lambda_{Qn} \\ \lambda_{Pn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \Delta \delta_1 \\ \Delta U_2 \\ \Delta \delta_2 \\ \Delta U_n \\ \Delta \delta_n \end{bmatrix}^{(k)}, \tag{\Pi3.12}$$

Далее выполняется проверка условия завершения итерационного процесса:

$$|\varepsilon_p, \varepsilon_Q| \le \varepsilon,$$
 (II3.13)

где  $\varepsilon$  — заданное значение точности выполнения расчетов, МВт (ПЗ.1- ПЗ.2). Если условие (ПЗ.13) не выполняется, выполнение алгоритма повторяется.

Итогом расчета является получение значений  $U_i$ ,  $\delta_i$  для всех узлов схемы, с использованием которых выполняется расчет потоков и потерь мощности в сети.

## Определение перетоков в начале и конце ветвей, определение токов в начале, конце ветвей и потерь активной мощности

Ветви «ЛЭП» и «Выкл»:

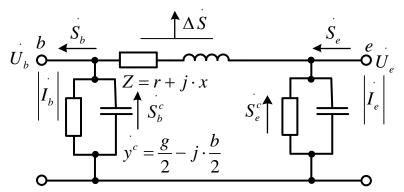


Рисунок ПЗ.1 – П-образная схема замещения ЛЭП

1. Определение продольной  $U_i$  и поперечной  $U_i$  составляющей напряжения в узлах:

$$U_{i} = U_{i} \cdot \cos(\delta_{i}),$$

$$U_{i} = U_{i} \cdot \sin(\delta_{i}),$$
(II3.14)

3. Определение комплекса напряжения в начале  $U_{\scriptscriptstyle b}$  и конце  $U_{\scriptscriptstyle e}$  ветви:

$$U_{b} = U_{i}^{*} + j \cdot U_{i}^{"},$$

$$U_{e} = U_{j}^{*} + j \cdot U_{j}^{"},$$
(II3.15)

3. Определение падения напряжения в ветви:

$$\Delta U = U_e - U_b, \tag{\Pi3.16}$$

4. Определение модуля и комплекса тока в ветви^

$$Z = r + j \cdot x,\tag{\Pi3.17}$$

$$I = \frac{\Delta U}{Z} = I + j \cdot I'', \tag{II3.18}$$

$$|I| = \sqrt{I^2 + I'^2},$$
 (II3.19)

5. Определение величины тока, вызванного наличием активной и емкостной проводимости в начале  $I_b^c$  и конце  $I_e^c$  линии:

$$I_b^c = U_b \cdot y^c, \tag{II3.20}$$

$$I_e^c = U_e \cdot y^c, \tag{II3.21}$$

6. Определение модуля и комплекса тока в начале и конце ветви

$$I_b = I - I_b^c, \ I_b = I_b^c + j \cdot I_b^c, \ \left| I_b^c \right| = \frac{\sqrt{I_b^2 + I_b^2}}{\sqrt{3}}$$
 (II3.21)

$$I_e = I_e^* + j \cdot I_e^*, \quad I_e = I_e^* + j \cdot I_e^*, \quad I_e^* = \frac{\sqrt{I_e^2 + I_e^{"2}}}{\sqrt{3}}$$
 (II3.22)

7. Определение перетока активной и реактивной мощности в начале и конце ветви.

$$S_b = U_b I_b, \tag{II3.23}$$

где  $I_b$  — сопряженный комплекс тока в начале ветви

$$S_{e} = U_{e} I_{e}, \qquad (\Pi 3.24)$$

где  $I_{\scriptscriptstyle e}$  – сопряженный комплекс тока в конце ветви

8. Определение зарядной активной и реактивной мощности в начале  $S_b^c$  и конце  $S_e^c$  ветви:

$$S_b^c = U_b \cdot I_b^c, \ S_e^c = U_e \cdot I_e^c$$
 (II3.25)

$$S^{c} = S_{b}^{c} + S_{e}^{c} \tag{\Pi3.26}$$

9. Определение потерь полной, активной и реактивной мощности.

$$\Delta S = |I|^2 Z,\tag{II3.27}$$

$$\Delta P = \text{Re}(\Delta S), \tag{II3.28}$$

$$\Delta O = \operatorname{Im}(\Delta S), \tag{\Pi 3.29}$$

#### Ветвь «Тр-р»:

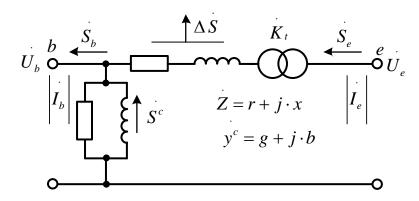


Рисунок П3.2 – Г-образная схема замещения ветви «Тр-р»

- 1.Определение продольной  $U_i$  и поперечной  $U_i$  составляющей напряжения в узлах производится по формуле (ПЗ.14).
- 3. Определение комплекса напряжения в начале  $U_b$  и конце  $U_e$  ветви производится по формуле (ПЗ.15).
  - 3. Определение падения напряжения в ветви:

$$\Delta U = \frac{\overset{*}{U_e}}{\overset{*}{K_t}} - \overset{*}{U_b} \tag{\Pi3.30}$$

где  $K_{t}$  - сопряженный комплекс коэффициента трансформации.

- 4. Определение модуля и комплекса тока в ветви выполняется по формулам ( $\Pi 3.17$ ) ( $\Pi 3.19$ ).
- 5. Определение величины тока, вызванного наличием активной и емкостной проводимости в начале линии выполняется по формуле (П3.20).

6. Определение модуля и комплекса тока в начале и конце ветви

$$I_{b} = I - I_{b}^{c}, \ I_{b} = I_{b}^{c} + j \cdot I_{b}^{"}, \ \left| I_{b}^{c} \right| = \frac{\sqrt{\Gamma_{b}^{2} + I_{b}^{"2}}}{\sqrt{3}},$$
 (II3.31)

$$I_e = \frac{I}{K_t}, \quad I_e = I_e + j \cdot I_e, \quad \left| I_e \right| = \frac{\sqrt{\Gamma_e^2 + I_e'^2}}{\sqrt{3}},$$
 (II3.32)

- 7. Определение перетока активной и реактивной мощности в начале и конце ветви по формулам (ПЗ.23) (ПЗ.24).
- 8. Определение зарядной активной и реактивной мощности в начале ветви:

$$S_b^c = U_b \cdot I_b^c, \tag{\Pi3.33}$$

$$S^c = S_b^c \tag{\Pi3.34}$$

9. Определение потерь полной, активной и реактивной мощности по формулам (ПЗ.27) – (ПЗ.29).

### Формы таблиц для ввода данных в табличном процессоре MS Excel

### Таблица П4.1 – Общие параметры расчета режима

Точность расчета	Макс. число	Макс. допустимое	Макс. допустимое	Макс. допустимый	№ п/п балансового
(dP, dQ)	итерация	снижение V	превышение V	угол по связи	узла
neb_pq	it_max	dv_min	dv_max	(dDelta)	N_bal
				dd_max	

## Таблица П4.2 – Описание переменных в таблице «Общие параметры расчета режима»

Заголовок	Тип	Название	Значение (по	Описание
	переменной		умолчанию)	
Точность расчета $(dP, dQ)$	веществ.	neb_pq	0,001 МВт (МВАр)	расчет нормально заканчивается, если небаланс активной и реактивной мощности в каждом узле становится меньше заданной величины.
Максимальное число итераций (It)	целая	it_max	20-50	если число проделанных итераций достигает заданной величины, то расчет заканчивается аварийно с выдачей соответствующего сообщения.
Макс. допустимое снижение V (dV-)	веществ.	dv_min	0,5Ином	максимально допустимое снижение напряжения по отношению к Uном. Если на входе расчета напряжение в каком-либо узле снизится больше указанной величины, то расчет аварийно завершится. При этом будет выдано соответствующее сообщение с номером узла, имеющего наименьшее напряжение.
Макс. допустимое превышение V (dV+)	веществ.	dv_max	2Ином	максимально допустимое превышение напряжения по отношению к Uном. Если в ходе расчета напряжение в каком-либо узле превысит указанную величину, то расчет аварийно завершится. При этом будет выдано соответствующее сообщение с номером узла, имеющего наибольшее напряжение.
Макс. допустимый угол по связи (dDelta)	целая	dd_max	90°	максимально допустимый угол по ветви (в градусах). Если в ходе расчета угол по какой-либо линии превысит указанную величину, то расчет аварийно завершится. При этом будет выдано соответствующее сообщение с номером ветви, имеющей наибольший угол.
№ п/п балансового узла	целая	N_bal	1	указывается номер балансирующего узла

Таблица П4.3 – Параметры узлов (Table "node")

№ узла п/п <b>прр</b>	№ ny <k></k>	Название <b>пате</b>	Сост sta	Uном <b>unom</b>	G gsh	B bsh	№ CXH <b>ns</b> x	Рн <b>рп</b>	Qн <b>qn</b>	Рнр <b>pnr</b>	Qнр <b>qnr</b>	Рг <b>р</b> g	Qг <b>qg</b>	Qmin qmin	Qmax <b>qmax</b>	V <sub>3</sub> vzd	V vr as	δ delt a	U` vpo p	U" vcros s
	1																			
	2																			
	3																			
	4																			
	5																			
	n											·								

Столбцы, выделенные серым цветом, заполняются автоматически после завершения расчета. При этом столбец Qг заполняется только в случае если генераторный узел задан как PU-узел.

Таблица П4.4 – Описание переменных в таблице «Параметры узлов»

Загол овок	Назва ние	Ед. изм.	Тип переменн ой	Описание
<b>№</b> узла п/п	npp	-	целая	Номер узла по порядку.
<b>№</b> узла	ny <k></k>	-	целая	Номер узла. Целое положительное число. Должно быть уникальным в пределах матрицы «Узлы».
Назва ние	name	-	текстовы й	Название узла
Сост	sta	«Откл » «База» «Нагр » «Ген»	Логич.	Список возможных состояний узла. Возможны следующе состояния:  • «Откл» – узел отключен;  • «База» – балансирующий узел (узел Uδ-типа);  • «Нагр» – нагрузочный узел (узел PQ-типа);  • «Ген» – генераторный узел с фиксированным напряжением без нарушения пределов по реактивной мощности (узел PU-типа);
Ином	unom	кВ	Веществ.	Номинальное напряжение узла в кВ. Используется в качестве начального приближения при расчете с плоского старта, а также для расчета отклонений в относительных единицах. При отсутствии плоского старта, расчет начинается с текущего начального приближения. Если это приближение получено после аварийного завершения расчета, программа выдаст дополнительный запрос на расчет с плоского старта.
G	gsh	мкСм	Веществ.	Активная проводимость шунта узла в мкСм. Знак «+» означает потребление активной мощности.
В	bsh	мкСм	Веществ.	Реактивная проводимость шунта узла в мкСм. Знак «+» означает потребление реактивной мощности (индуктивный шунт), знак «-» – генерацию реактивной мощности (емкостной шунт).
№ CXH	nsx	-	целая	Номер статической характеристики нагрузки в таблице «СХН». Необязательный параметр. Статические характеристики задаются в соответствующей матрице.
Рн	pn	МВт	Веществ.	Мощность активной нагрузки узла в МВт. Знак «-» означает генерацию. При выполнении расчета по алгоритму Блока 3, данные берутся из таблицы «Замеры нагрузок».
Qн	qn	MBAp	Веществ.	Мощность реактивной нагрузки узла в МВАр. Знак «-» означает генерацию. При выполнении расчета по алгоритму Блока 3, данные берутся из таблицы «Замеры нагрузок».
Рнр	pnr	МВт	Веществ.	Расчетная мощность активной нагрузки узла в МВт с учетом СХН. Будет равна Рн если № СХН не задан. Столбец заполняется автоматически.

Загол овок	Назва ние	Ед. изм.	Тип переменн ой	Описание
Qнp	qnr	MBAp	Веществ.	Расчетная мощность реактивной нагрузки узла в MBAp с учетом СХН. Будет равна Qн если № СХН не задан. Столбец заполняется автоматически.
Рг	pg	МВт	Веществ.	Мощность активной генерации узла в МВт. Знак «- » означает потребление.
Qг	qg	MBAp	Веществ.	Мощность реактивной генерации узла в МВАр. Знак «-» означает потребление.
Qmin	qmin	MBAp	Веществ.	Ограничение минимума генерации реактивной мощности в генераторном узле в МВАр. Имеет смысл, если задано значение V3 в таблице «Узлы».
Qmax	qmax	MBAp	Веществ.	Ограничение максимума генерации реактивной мощности в генераторном узле в МВАр. Имеет смысл, если задано значение V3 в таблице «Узлы». Должно быть больше Qmin для этого же узла.
V3	vzd	кВ	Веществ.	Значение модуля напряжения в кВ, которое необходимо выдержать в процессе расчета в этом узле. Если не задано, модуль напряжения в узле будет рассчитан. Если задано, должны быть так же заданы Qmax > Qmin для этого узла.
V	vras	кВ	Веществ.	Расчетный модуль напряжения в узле
δ	delta	0	Веществ.	Расчетный угол дельта
U`	vpop	кВ	Веществ.	Продольная составляющая напряжения
U"	vcross	кВ	Веществ.	Поперечная составляющая напряжения

Таблица П4.5 – Параметры ветвей

№ Вет ви <b>N_v</b> <b>etv</b>	№нач <b>ip<k></k></b>	№кон iq <k></k>	№пар <b>np<k></k></b>	Тип ветви <b>tip</b>	Дисп. Наимено вание <b>dname</b>	Названи е <b>name</b>	Сост sta	R r	X x	G g	В <b>b</b>	Nанц n_anc	БД_а нц <b>bd</b>	KTr e ktr re	Ктіт ktri m	Pb <b>pl_ip</b>	Qb ql_i p	Pe pl_iq	Qe ql_iq	Ib ib	Ie ie	d S d s	dP <b>dp</b>	d Q <b>d</b> <b>q</b>
1	1	2																						
2	3	4																						
•••																								

Сначала задаются следующие параметры: №нач, №кон, №пар, Сост, R, X, G, B, Nанц, БД анц.

Столбец «Название» заполняется после введения данных в столбцы «№нач», «№кон».

Столбец «Кт» заполняется после введения данных в столбцы *«№анц»* и *«БД\_анц»* или может заполняться непосредственно.

Столбцы, выделенные зеленым цветом, заполняются автоматически после завершения расчета.

Таблица П4.6 – Описание переменных в таблице «Параметры ветвей»

Заголовок	Название	Ед. изм.	Тип переменной	Описание	
№ветви	N_vetv	-	Целая	Номер ветви (задается по порядку автоматически)	
<b>№</b> нач	ip <k></k>	-	Целая	Номер узла начала ветви	
<b>№</b> кон	iq <k></k>	-	Целая	Номер узла конца ветви	
<b>№</b> пар	np <k></k>	-	Целая	Номер параллельной ветви	
Тип ветви	tip	«Тр-р» «Выкл» «ЛЭП»	Логич.	Тип ветви «Тр-р» - трансформаторная ветвь, «Выкл» - выключатель, «ЛЭП» - линия электропередач	
Дисп. наименован ие	dname	-	текстовый	Диспетчерское наименование ветви. Например, «ф. 10-17-С», «Т-2-10 ПС Абагурская»	
Название	name	-	текстовый	Название ветви. Формируется автоматически по названиям узлов начала и конца ветви.	
Сост	sta	«вкл» «откл»	Логич.	Состояние ветви. Может быть «вкл» или «откл»	
R	r	Ом	Веществ.	Активное сопротивление ветви в Ом. Может быть нулевым.	
X	Х	Ом	Веществ.	Реактивное сопротивление ветви в Ом. Может быть нулевым или отрицательным.	
G	g	мкСм	Веществ.	Активная проводимость на землю в мкСм. Знак «+» означает потребление активной мощности.	
В	b	мкСм	Веществ.	Реактивная проводимость на землю в мкСм. Знак «-» означает генерацию реактивной мощности, знак «+» потребление реактивной мощности.	
N анц	n_anc	-	Целая	Номер анцапфы трансформатора. Ссылается на матрицу коэффициентов трансформации.	
БД_анц	bd	-	Целая	Номер трансформатора в таблице «БД анц»	
Ктге	ktrre	-	Веществ.	Вещественная часть коэффициента трансформации. Задается только для трансформаторных ветвей. Для остальных ветвей равен единице.	
Ктіт	ktrim	-	Веществ.	Мнимая часть коэффициента трансформации.	
Pb	pl_ip	МВт	Веществ.	Переток активной мощности в начале ветви	
Qb	ql_ip	MBAp	Веществ.	Переток реактивной мощности в начале ветви	
Pe	ql_ip	МВт	Веществ.	Переток активной мощности в конце ветви	
Qe	pl_iq	MBAp	Веществ.	Переток реактивной мощности в конце ветви	
Ib	ib	A	Веществ.	Ток в начале ветви	
Ie	ie	A	Веществ.	Ток в конце ветви	
dS	ds	MBA	Веществ.	Потери полной мощности в ветви	
dP	dp	МВт	Веществ.	Потери активной мощности в ветви	
dQ	dq	MBAp	Веществ.	Потери реактивной мощности в ветви	

Таблица П4.7–Статические характеристики нагрузки по U

№ nsx <k></k>	Vmin <b>vmin</b>	P0 <b>p0</b>	P1 <b>p1</b>	P2 <b>p2</b>	Q0 <b>q0</b>	Q1 <b>q1</b>	Q2 <b>q2</b>
1							
n							

Таблица П4.8 – Описание переменных в таблице «Статические характеристики нагрузки по U»

Заголовок	Название	Тип	Описание
		переменной	
$\mathcal{N}_{\underline{0}}$	nsx <k></k>	Целая	Номер статической характеристики. Является
			уникальным в пределах матрицы «СХН». Если
			этот номер ввести в столбец «№ СХН» узла,
			нагрузка узла будет зависеть от напряжения
			узла по этой характеристике
Vmin	vmin	Веществ.	Модуль напряжения, с которого начинает
			действовать заданный участок статической
			характеристики.
P0	p0	Веществ.	Постоянный коэффициент по активной
			мощности
P1	p1	Веществ.	Линейный коэффициент по активной мощности
P2	p2	Веществ.	Квадратичный коэффициент по активной
			мощности
Q0	q0	Веществ.	Постоянный коэффициент по реактивной
			мощности
Q1	q1	Веществ.	Линейный коэффициент по реактивной
			мощности
Q2	q2	Веществ.	Квадратичный коэффициент по реактивной
			мощности

Таблица П4.9 – Параметры УРПН

N_bd	Название	Кнейт	V_нр	V_рег	N_cp	dVreg
N_bd	name	kne	vnr	vreg	n_cp	vreg
1						

Из таблицы «Параметры УРПН» извлекаются данные для вычисления коэффициента трансформации ветвей типа «Тр-р» в таблице «Ветви».

Таблица П4.10 – Описание переменных в таблице «Параметры УРПН»

Заголовок	Название	Ед.	Тип	Описание
Sui onobok		изм.	переменной	Onneume
N_bd	N_bd	ı	Целая	Номер устройства регулирования (РПН, ПБВ)
Название	name	-	Текстов.	Наименование устройства регулирования
Кнейт	kne	-	Веществ.	Коэффициент трансформации в нейтральном
КНСИТ				положении
V_нр	vnr	кВ	Веществ.	Напряжение нерегулируемой ступени
V_рег	vreg	кВ	Веществ.	Напряжение регулируемой ступени
N_cp	n_cp	-	Целая	Номер нейтральной анцапфы
dVreg	vreg	%	Веществ.	Величина шага %

### Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ



#### Заявка на государственную регистрацию программы ЭВМ



11-2018

МИНОБРНАУКИ РОССИИ федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «КУЗБАССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ имени Т.Ф.ГОРБАЧЕВА» (КуЗГТУ)

Весенняя ул., д. 28, г. Кемерово, 650000 тел./ факс: (384-2) 39-69-60, факс: (384-2) 68-23-23 <a href="http://www.kuzstu.ru">http://www.kuzstu.ru</a> e-mail: kuzstu@kuzstu.ru ОКПО 02068338 01 РН 1024200708069 ИНН / КПП 4207012578 / 420501001

18.0	5.2018 No 02-12-1412
На №	OT

В отдел регистрации программ для ЭВМ, баз данных, топологий ИМС и передачи прав на них Федерального государственного учреждения «Федеральный институт промышленной собственности» Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным собственности, патентам и товарным

Бережковская наб., 30, корп. 1, Москва, Г-59, ГСП-3, 125993

знакам (ФГУ ФИПС)

[О регистрации программы для ЭВМ]

Направляю Вам на регистрацию программу для ЭВМ «Программа для расчета электрических режимов и имитации оптимального регулирования напряжения в системах электроснабжения угольных шахт», правообладателем исключительного права на которую (заявителем) является федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» (КузГТУ) с выдачей одного свидетельства.

Комплектность заявки указана в приложении.

#### Приложение:

1.	Заявление	на	1	Л.	В	1	экз.
2.	Дополнение к заявлению	на	1	л.	В	1	экз.
3	Распечатка фрагментов исходного текста	***	20	120		1	
٥.	программы	на	29	Л.	В	1	ЭКЗ.
4.	Распечатка фрагментов аудиовизуальных	на	6	Л.	В	1	экз.
	отображений, порождаемых программой						
5.	Реферат	на	1	Л.	В	2	экз.
6.	Платежный документ об уплате госпошлины	на	1	Л.	В	1	экз.
7.	Диск с программой для ЭВМ				В	1	экз.

Свидетельство прошу выслать по почте.

Проректор по учебной работе

Харитонов И.Ю., тел. 8 (384-2) 39-69-90

#### Акты внедрения результатов диссертационной работы

РОССЕТИ	мрск сибири кузбассэнерго - рэс	ул. Н. Островского, д.11 г. Кемерово, Кемеровская область, Российская Федерация, 650991, ГСП 1 Тел. приемной: (3842) 45-53-10, Тел.факс. 8(3842) 45-49-34 е-mail: Keinfo@ke.mrsks.ru ИНН 2460069527, КПП 997450001, р/с 40702810400340000034, Ф-л ГПБ (ОАО) в г. Красноярске кор.сч. 3010181010000000877 БИК 040407877
Ha	ОТ	
		УТВЕРЖДАЮ:
		И.о. заместителя директора по
,		техническим вопросам -
		главного инженера
		филиала ПАО «МРСК Сибири» -
		«Кузбассэнерго-РЭС»
		<u>Мосила</u> А.И. Костин
		« // 2018 г.

## внедрения результатов диссертационной работы Непши Ф.С. «Повышение энергоэффективности систем электроснабжения угольных шахт при оптимальном регулировании напряжения»

**AKT** 

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационного исследования аспиранта кафедры ГМиК, старшего преподавателя кафедры ЭГПП Ф.С. Непши рекомендуются к использованию в работе отдела электрических режимов ЦУС Филиала ПАО «МРСК Сибири» - «Кузбассэнерго – РЭС», а именно:

- алгоритм оптимизации уровня напряжения в СЭС угольных шахт;
- рекомендации по регулированию напряжения на шинах ГПП угольных шахт с учетом статических характеристик нагрузки по напряжению;
- алгоритм определения статических характеристик асинхронных двигателей (АД) по напряжению и его программная реализация;

Результаты диссертационного исследования рекомендуются для использования при выполнении следующих задач:

- 1. Определение уставок блоков автоматического регулирования (БАР) УРПН на подстанциях, питающих угольные шахты.
- 2. Формирование графиков напряжений в контрольных точках сети Филиала ПАО «МРСК Сибири» «Кузбассэнерго РЭС».
- 3. Анализ статической устойчивости в процессе расчета электрических режимов на стадии эксплуатации и предварительной оценки вариантов развития сети.

Применение результатов исследования в решении вышеуказанных задач позволит:

- 1. Повысить эффективность работы БАР УРПН на подстанциях, питающих угольные шахты Кузбасса и обеспечить нормативный уровень напряжения в условиях постоянного изменения уровня напряжения в системообразующей сети.
  - 2. Повысить энергоэффективность системы Бланк Нецинго 61

электроснабжения угольных шахт за счет определения оптимального уровня напряжения в узлах сети.

3. Повысить точность расчета электрических режимов при анализе статической устойчивости энергосистемы и учесть особенности работы горно-шахтного оборудования при формировании графиков напряжения.

Начальник отдела электрических режимов ЦУС

Заместитель главного инженера по оперативно-технологическому и ситуационному управлению - начальник ЦУС

Д.Ф. Воропаев

А.А. Сибиряков



минобрнауки РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «КУЗБАССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ имени Т.Ф.ГОРБАЧЕВА» (КузГТУ)

Институт энергетики

Красноармейская ул., д. 117, г. Кемерово, 650000

тел.: (384-2) 39-63-37 тел./ факс: (384-2) 39-69-60

<u>http://www.kuzstu.ru</u> e-mail<u>: kuzstu@kuzstu.ru</u> ОКПО 02068338 ОГРН 1024200708069 ИНН / КПП 4207012578 / 420501001

18.05.2018 No 0612-459

#### AKT

внедрения результатов диссертационной работы Непши Ф.С. «Повышение энергоэффективности систем электроснабжения угольных шахт при оптимальном регулировании напряжения»

Комиссия в составе заведующего кафедрой «Электроснабжения горных и промышленных предприятий», канд. техн. наук, Захарова С.А., профессора кафедры «Электроснабжения горных и промышленных предприятий», докт. техн. наук, Лебедева Г.М., заместителя директора по научно-инновационной работе института энергетики КузГТУ, канд. техн. наук, Беляевского Р.В. рассмотрела результаты диссертационной работы Непши Ф.С. и приняла следующее решение: принять к внедрению теоретические и практические результаты диссертационной работы Непши Ф.С. «Повышение энергоэффективности систем электроснабжения угольных шахт при оптимальном регулировании напряжения» в образовательный процесс по дисциплинам «Применение современных программных комплексов в энергетике», «Методы расчета и анализа электрических режимов» и «Электрические сети и студентов направления подготовки бакалавров ДЛЯ системы» «Электроэнергетика и электротехника», направления подготовки магистров 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» и направления подготовки аспирантов 13.06.01 «Электро- и теплотехника».

Профессор кафедры электроснабжения горных и промышленных предприятий, д.т.н.

Заместитель директора по научно-инновационной работе Института энергетики КузГТУ, к.т.н.

Заведующий кафедрой электроснабжения горных и промышленных предприятий, к.т.н.

Г.М. Лебедев

Р.В. Беляевский

С.А. Захаров