

На правах рукописи



Непша Федор Сергеевич

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ
СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ УГОЛЬНЫХ ШАХТ
ПРИ ОПТИМАЛЬНОМ РЕГУЛИРОВАНИИ НАПРЯЖЕНИЯ

Специальность: 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Кемерово – 2018

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева»

Научный руководитель: кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
Ефременко Владимир Михайлович

Официальные оппоненты:

Абрамович Борис Николаевич доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», профессор кафедры электроэнергетики и электромеханики

Русина Анастасия Георгиевна доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», профессор кафедры автоматизированных электроэнергетических систем

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (г. Томск)

Защита состоится 08 ноября 2018 г. в 12:30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.102.01 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» по адресу: 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, тел./факс: (384-2) 68-23-23, e-mail: siyu.eav@kuzstu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» и на сайте:

<http://science.kuzstu.ru/wp-content/docs/OAD/Soresearchers/2018/nep/Dissertation.pdf>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Семькина Ирина Юрьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 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 понижающей 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 нагрузки электродвигателей по напряжению.

В связи с вышесказанным разработка алгоритма оптимального регулирования напряжения с учетом статических характеристик нагрузки по напряжению 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, O. Richardot и др.

Несмотря на значительный объем проведенных исследований, разработанные системы регулирования напряжения не адаптированы для применения в СЭС угольных шахт и не позволяют взаимосвязанно задействовать все име-

ющиеся 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 современного горно-шахтного оборудования. При этом шахтовые электродвигатели имеют более тяжелые условия работы и пуска по сравнению с электродвигателями общепромышленного 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.

Разработанный алгоритм оптимизации уровня напряжения может быть использован для определения уставок блоков автоматического регулирования (БАР) УРПН на подстанциях, питающих угольные шахты.

Разработанная имитационная модель СЭС угольной шахты может быть использована при формировании графиков напряжения в контрольных точках сети энергоснабжающих организаций и при разработке рекомендаций по регулированию напряжения в СЭС угольных шахт с целью снижения потерь активной энергии.

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 выполнению

ной 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 конференции «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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, определены научная новизна и научные положения, теоретическая и практическая значимость результатов исследований.

В первой главе выполнен анализ состояния проблемы регулирования напряжения в СЭС угольных шахт Кузбасса.

Регулирование напряжения в СЭС угольных шахт требует выполнения задач обеспечения нормативного уровня напряжения и минимизации потерь электроэнергии в шахтовой сети.

Проведенный статистический анализ уровня напряжения в схеме внешнего и внутреннего электроснабжения угольных шахт Кузбасса показал, что стандартное отклонение напряжения увеличивается по мере приближения к электроприемникам с $\pm 1,1\%$ от номинального напряжения ($U_{ном}$) на шинах питающей подстанции 110 кВ до $\pm 3,5\% U_{ном}$ на шинах 6 кВ ГПП. При этом диапазон одиночных отклонений напряжения может достигать $-16,9 \div (+6,2)\% U_{ном}$. Следовательно, задача обеспечения нормативного напряжения

не всегда выполняется, и на шинах ГПП становится рациональным осуществлять регулирование напряжения, используя как минимум 4 ступени регулирования УРПН.

Анализ существующего алгоритма регулирования напряжения (рисунок 1) показывает, что в процессе регулирования не обеспечивается минимизация потерь электроэнергии, а использование соответствующего устройства регулирования четко не определено и обосновано только практическим опытом. При этом обратная связь по напряжению между электроприемниками и регуляторами осуществляется человеком, что сказывается на быстроте действия и правильности принимаемых решений.

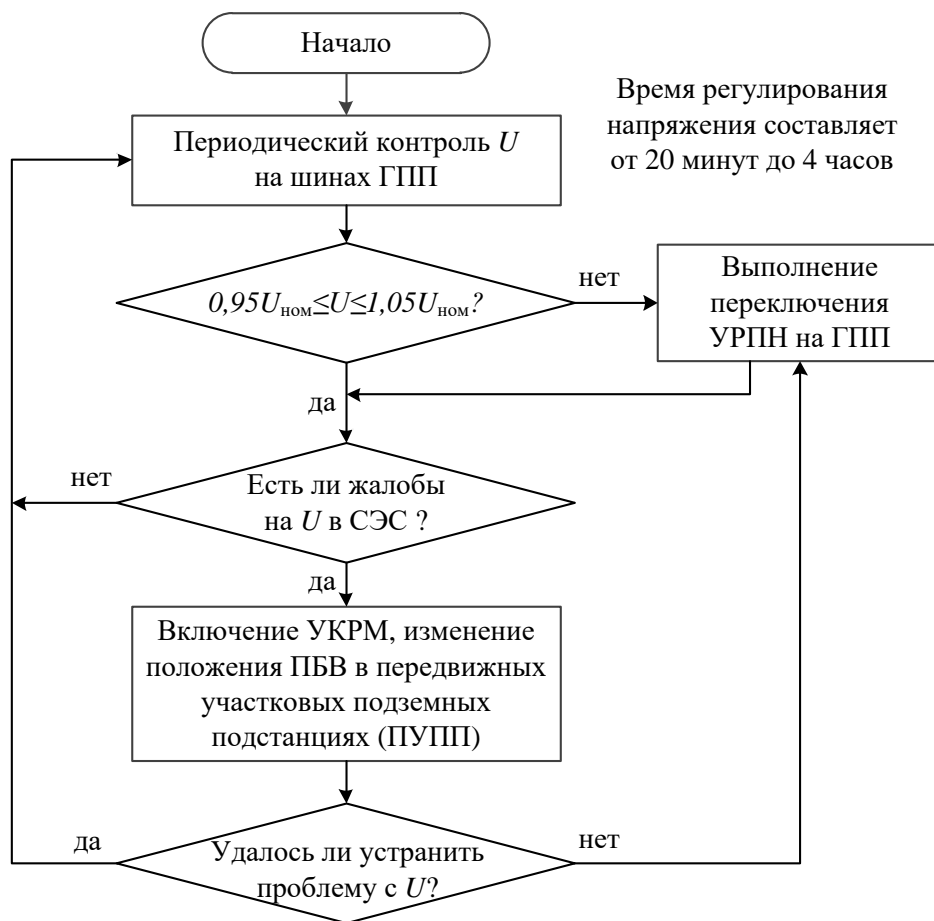


Рисунок 1 – Существующий алгоритм регулирования напряжения в СЭС угольных шахт

По результатам анализа были выявлены особенности использования технических средств регулирования напряжения: неиспользование УРПН в автоматическом режиме, автоматическое управление БСК только по критерию обеспечения заданного $\text{tg}\phi$, отсутствие согласованности средств регулирования напряжения, неиспользование синхронных машин для компенсации реактивной мощности и регулирования напряжения.

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что устройства регулирования напряжения в СЭС угольных шахт Кузбасса используются неэффективным образом.

При наличии оснований и реализации во взрывозащищенном исполнении в СЭС угольных шахт могут быть использованы индивидуальные средства регулирования напряжения (устройства динамической компенсации реактивной мощности (ДКРМ), вольтодобавочные трансформаторы (ВДТ), ПУПП с тиристорными УРПН, установки продольной компенсации (УПК), тиристорные регуляторы напряжения (ТРН)).

Следует отметить, что «Долгосрочная программа развития угольной промышленности на период до 2030 года» предусматривает развитие возобновляемых источников энергии и генерации с использованием метана угольных пластов. Следовательно, при оптимальном регулировании напряжения необходимо учитывать возможное присоединение генераторных установок.

Анализ влияния отклонения напряжения от номинального уровня на режим потребления угольной шахты показал, что уровень потребления активной и реактивной мощности определяется шахтовыми АД, которые составляют около 70% установленной мощности нагрузки. При этом статические характеристики нагрузки АД по напряжению, определенные для электродвигателей общепромышленного исполнения не могут быть использованы при решении задачи регулирования напряжения в связи с отличием их характеристик от характеристик шахтовых электродвигателей.

Проведенный анализ проблемы регулирования напряжения в СЭС угольных шахт позволил сделать следующие выводы:

1. Существующий алгоритм регулирования напряжения в СЭС угольных шахт требует существенной доработки в связи неполным выполнением задач регулирования напряжения.
2. Современный уровень технологического оснащения угольных шахт требует разработки алгоритма регулирования напряжения, учитывающего особенности существующих устройств регулирования.
3. При оптимальном регулировании напряжения по критерию минимума потерь активной мощности целесообразно учитывать возможное присоединение генераторных установок к СЭС угольной шахты.
4. Ранее проведенные исследования показали, что для реализации оптимального регулирования напряжения в первую очередь требуется исследование статических характеристик и регулирующих эффектов нагрузки шахтовых АД по напряжению.

Вторая глава посвящена исследованию процесса потребления активной и реактивной мощности в СЭС угольных шахт в зависимости от напряжения.

При решении задачи минимизации потерь активной мощности целесообразно рассматривать изменение уровня потребления активной и реактивной мощности в диапазоне изменения напряжения $0,9-1,1U_{ном}$, т.к. он соответствует предельно допустимым отклонениям напряжения, установленным ГОСТ 32144-2013. Поскольку характер статических характеристик нагрузки АД по напряжению в этом диапазоне практически линейный, для аппроксимации статических характеристик нагрузки по напряжению достаточно ис-

пользовать полиномы 1-й степени:

$$P(U) = P_n P_*(U) = P_n \left[a_0 + a_1 \cdot \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right) \right], \quad (1) \quad Q(U) = Q_n Q_*(U) = Q_n \left[b_0 + b_1 \cdot \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right) \right], \quad (2)$$

где P_n и Q_n – активная (кВт) и реактивная мощности (кВАр) АД при номинальном напряжении; $P_*(U)$ и $Q_*(U)$ – статические характеристики активной, реактивной нагрузки АД по напряжению в относительных единицах; $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение АД или сети; a_0, b_0, a_1, b_1 – коэффициенты полинома 1-й степени функций $P_*(U)$ и $Q_*(U)$.

Для определения коэффициентов полинома 1-й степени функций $P_*(U)$ и $Q_*(U)$ разработан алгоритм (рисунок 2), на основании которого в среде MATLAB создана программа (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018616064, дата приоритета 05.04.2018), позволяющая оперативно сформировать базу статических характеристик нагрузки шахтовых АД по напряжению.

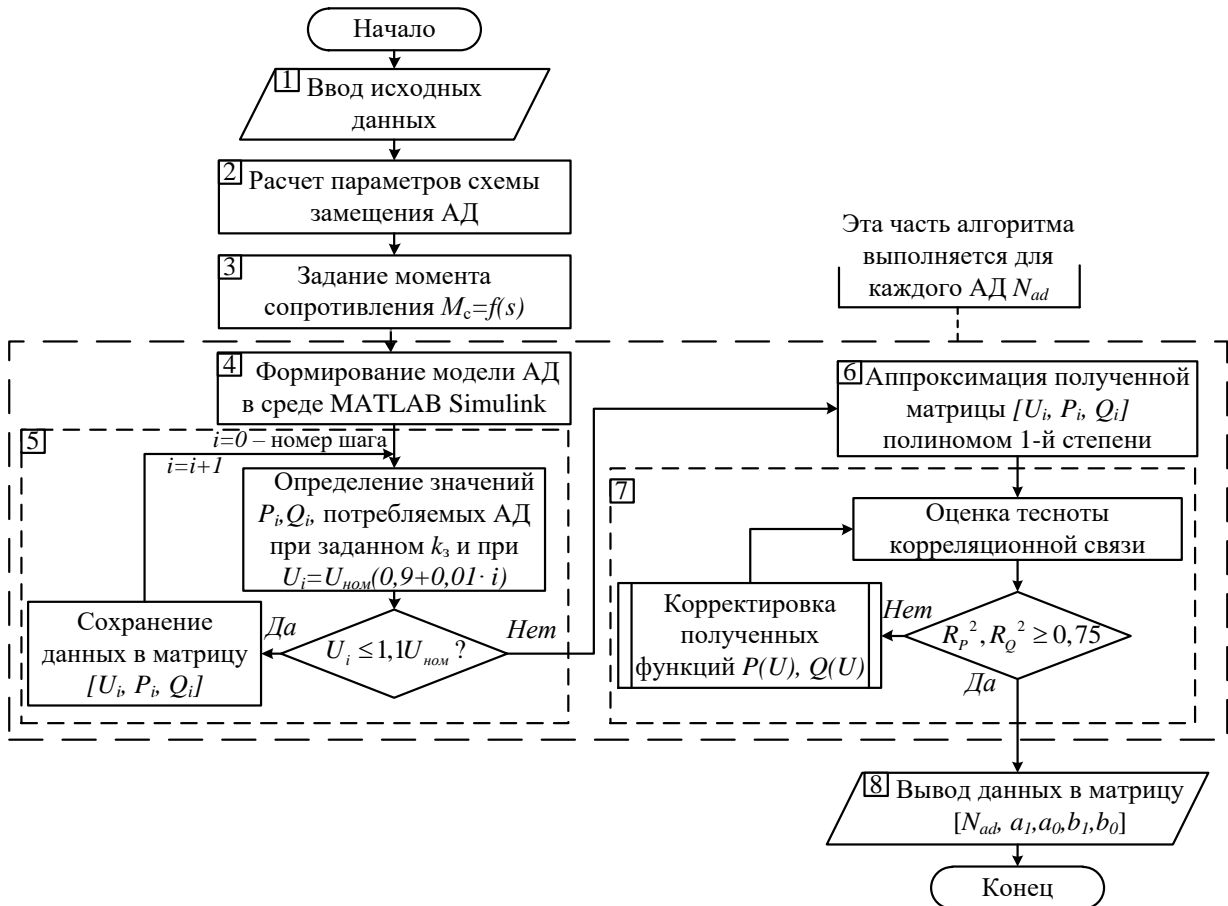


Рисунок 2 – Алгоритм определения параметров статических характеристик нагрузки АД по напряжению с использованием MATLAB Simulink

Регулирующие эффекты активной (α_1) и реактивной (β_1) нагрузки по напряжению равны соответственно:

$$\alpha_1 = \frac{dP}{dU}, \quad (3) \quad \beta_1 = \frac{dQ}{dU}, \quad (4)$$

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

С использованием разработанного алгоритма и формул (3-4) выполнен анализ статических характеристик и регулирующих эффектов нагрузки по напряжению для шахтовых АД разных типов и мощностей. В результате установлено, что изменение напряжения на 1% от номинального практически не приводит к изменению потребления активной мощности ($\alpha_1 = -0,083 \pm 0,028\%$) и, следовательно, она может приниматься постоянной. Регулирующий эффект по напряжению для реактивной нагрузки шахтовых АД находится в пределах 0,95 – 2,6%. При этом его значение обратно пропорционально количеству пар полюсов, номинальной мощности и коэффициенту загрузки АД.

Для оценки влияния ПУПП на уровень потерь активной и реактивной мощности, были построены графики зависимостей α_1 , $\beta_1 = f(k_3)$ для ПУПП разных номинальных мощностей (рисунок 3).

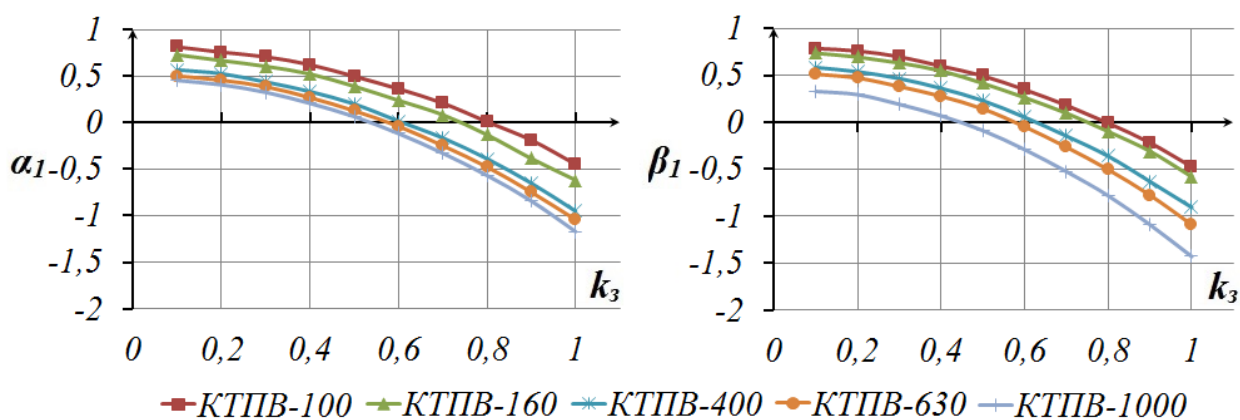


Рисунок 3 – Графики зависимостей α_1 , $\beta_1 = f(k_3)$ для ПУПП

Анализ графиков показал, что с увеличением загрузки регулирующие эффекты потерь активной и реактивной мощности в ПУПП по напряжению становятся отрицательными. При загрузке ПУПП ниже критического уровня регулирующие эффекты потерь активной и реактивной мощности по напряжению становятся положительными и увеличиваются. С увеличением номинальной мощности ПУПП значение критической загрузки, при которой наблюдается отрицательный регулирующий эффект уменьшается. При этом регулирующие эффекты по напряжению для потерь активной и реактивной мощности ПУПП изменяются в пределах от -1,17 до 0,51 и от -1,53 до 0,79 соответственно.

Для определения эквивалентных статических характеристик нагрузки ПУПП с электроприемниками, на зажимах которых отсутствует возможность контроля фактического уровня напряжения и потребления, был разработан алгоритм.

С его использованием было установлено, что значение коэффициента загрузки k_3 , при котором минимальный уровень потерь активной мощности соответствует $U_{ном}$, определяется мощностью АД и протяженностью низковольтных сетей. При увеличении единичной мощности АД и уменьшении протяженности низковольтных сетей значение коэффициента загрузки, при котором минимальный уровень потерь активной мощности соответствует

номинальному напряжению, уменьшается.

Для оценки влияния трансформаторов ГПП на уровень потребления активной и реактивной мощности, были построены графики зависимостей ΔP^* , $\Delta Q^* = f(n)$ при различных коэффициентах загрузки трансформатора k_3 (рисунок 4).

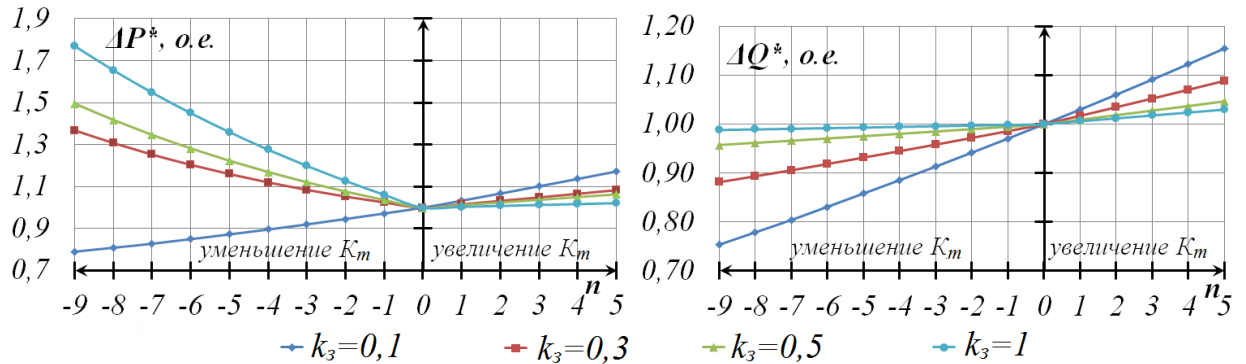


Рисунок 4 – Графики зависимостей ΔP^* , $\Delta Q^* = f(n)$ при различных коэффициентах загрузки трансформатора k_3

Анализ графиков показал, что характер изменения потерь активной и реактивной мощности зависит от направления переключения УРПН относительно нейтрального положения. При увеличении коэффициента трансформации (K_T) прирост потерь активной и реактивной мощности 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.

Для оценки влияния уровня напряжения на суммарные потери активной мощности были получены обобщенные статические характеристики по напряжению для различных режимов работы СЭС угольной шахты (рисунок 5).

Данные рисунка 5 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 установленной мощности отдельных электродвигателей и их коэффициента загрузки. При увеличении загрузки более мощных двигателей целесообразно увеличивать уровень напряжения значительно, чем при загрузке мало-

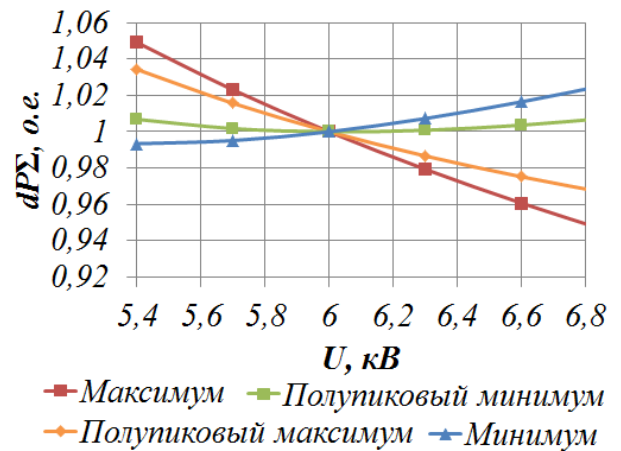


Рисунок 5 – Обобщенные статические характеристики потерь активной мощности по напряжению

ных двигателей. Это связано, с тем что регулирующий эффект по напряжению для реактивной мощности уменьшается при увеличении загрузки и номинальной мощности двигателя.

Полученные эквивалентные статические характеристики нагрузки по напряжению могут быть использованы при разработке рекомендаций по регулированию напряжения в условиях существующей системы регулирования.

Третья глава посвящена описанию разработанной системы регулирования напряжения в СЭС угольной шахты и разработке алгоритма оптимизации дискретных и недискретных параметров устройств регулирования напряжения по критерию минимума потерь активной мощности.

В рамках рассматриваемой СЭС должны быть учтены следующие зависимости и элементы: статические характеристики нагрузки по напряжению электроприемников, устройства компенсации реактивной мощности (УКРМ), УРПН на трансформаторах; зависимости нагрузочных потерь в трансформаторах ГПП от положения анцапф УРПН.

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_T , номер ступени регулирования БСК $n_{БСК}$. Недискретными переменными являются значения генерации реактивной мощности синхронными машинами $Q_{см}$.

Целевая функция и граничные условия оптимизации уровня напряжения в СЭС угольной шахты по критерию минимума потерь активной мощности представлены в (5).

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta P \rightarrow \min; \\ \Delta P = f(U_{ЭПm}, U_{ПУППn}, U_{СМj}, U_{БСКb}, P_{ЭПm}, Q_{ЭПm}, P_{ПУППn}, Q_{ПУППn}, P_{СМj}, Q_{СМj}, Q_{БСКb}, K_T); \\ P_{ЭПm} = f_{ЭП(P)m}(U_{ЭПm}), Q_{ЭПm} = f_{ЭП(Q)m}(U_{ЭПm}), \\ P_{ПУППn} = f_{ПУПП(P)n}(U_{ПУППn}), Q_{ПУППn} = f_{ПУПП(Q)n}(U_{ПУППn}); \\ K_T = f_T(n_T), Q_{БСКb} = f_{БСК}(U_{БСКb}, n_{БСКb}); m \in \overline{1, M}; n \in \overline{1, N}; j \in \overline{1, J}; b \in \overline{1, B}; \\ K_{T.мин} \leq K_T \leq K_{T.макс}; Q_{СМ.минj} \leq Q_{СМj} \leq Q_{СМ.максj}; \\ U_{ЭП.минm} \leq U_{ЭПm} \leq U_{ЭП.макс m}; U_{ПУПП.минn} \leq U_{ПУППn} \leq U_{ПУПП.макс n}; \\ U_{СМ.минj} \leq U_{СМj} \leq U_{СМ.макс j}; U_{БСК.минb} \leq U_{БСКb} \leq U_{БСК.макс b}; \end{array} \right. \quad (5)$$

где ΔP – потери активной мощности в СЭС угольной шахты; M – количество электроприемников с контролируемым уровнем нагрузки; N – количество ПУПП, питающих группу электроприемников, не имеющих устройств телеизмерений; J – количество синхронных машин; B – количество БСК; $U_{ЭПm}$, $U_{ПУППn}$, $U_{СМj}$, $U_{БСКb}$ – уровень напряжения в узлах СЭС; $U_{ПУПП.минn}$, $U_{ПУПП.макс n}$, $U_{ЭП.минm}$, $U_{ЭП.макс m}$, $U_{СМ.минj}$, $U_{СМ.макс j}$, $U_{БСК.минb}$, $U_{БСК.макс b}$ – максимальные и минимальные ограничения по уровню напряжения, определяемые требованиями ГОСТ, паспортными данными электрооборудования; $Q_{СМ.минj}$, $Q_{СМ.макс j}$ – максимальные и минимальные ограничения по уровню потребления (генерации) реактивной мощности, определяемые паспортными данными синхрон-

ных машин и P - Q диаграммой; $P_{ЭПm} = f_{ЭП(P)m}(U_{ЭПm})$, $Q_{ЭПm} = f_{ЭП(Q)m}(U_{ЭПm})$ – статистические характеристики нагрузки по напряжению для m -ого электроприемника угольной шахты, $P_{ПУППn} = f_{ПУПП(P)n}(U_{ПУППn})$, $Q_{ПУПП(Q)n} = f_{ПУПП(Q)n}(U_{ПУППn})$ – статистические характеристики нагрузки по напряжению для n -й группы электроприемников; $Q_{БСКb}$ – реактивная мощность, генерируемая b -й БСК, $K_{Т.мин}$, $K_{Т.макс}$ – минимальный и максимальный коэффициенты трансформации трансформатора ГПП.

С учетом полученной целевой функции (5) был разработан алгоритм оптимизации уровня напряжения в СЭС угольной шахты по критерию минимума потерь активной мощности (рисунок 6).

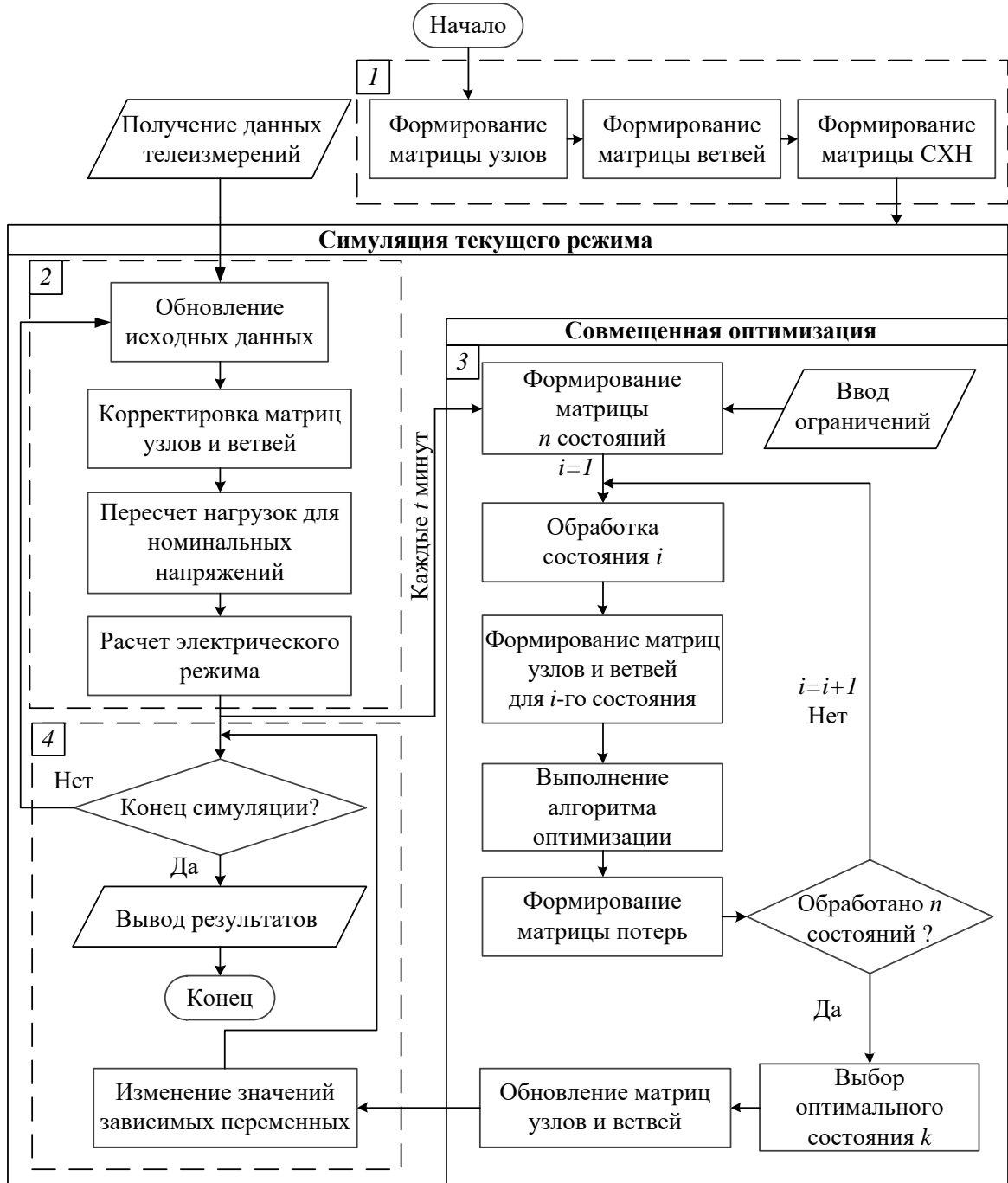


Рисунок 6 – Алгоритм оптимизации уровня напряжения в СЭС угольной шахты по критерию минимума потерь активной мощности

Предложенный алгоритм включает в себя выполнение следующих блоков:

Блок 1 – подготовка исходных данных. В нем выполняется сбор данных о топологии электрической сети и формируется матрица статических характеристик нагрузки по напряжению.

Блок 2 – обновление исходных данных и симуляция 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. Анализ показал, что в наибольшей степени требованиям точности, сходимости и удобства реализации для решения задачи расчета электрического режима отвечает метод Ньютона с расчетом коэффициента демпфирования по схеме Энеева – Матвеева.

Блок 3 – Совмещенная оптимизация. В нем с определенной периодичностью осуществляется определение значений зависимых переменных для получения минимума целевой функции (5).

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.

Для сокращения количества рассматриваемых состояний необходимо выполнить следующее:

- рассматривать отдельно части СЭС угольной шахты, питаемые от каждого трансформатора ГПП;
- рассматривать только соседние номера ступеней регулирования УРПН ($n_{\text{тек}}$, $n_{\text{тек}}+1$, $n_{\text{тек}}-1$).

В итоге полученная матрица состояний СЭС, при наличии УКРМ с тремя ступенями регулирования будет включать не более 9 возможных состояний.

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 значения напряжения на шинах ГПП.

В качестве методов оптимизации значений недискретных переменных рассматриваются два наиболее современных метода: метод внутренней точки (Interior point) и метод последовательного квадратичного программирования

(SQP). Эти методы являются наиболее совершенными для решения поставленной задачи нелинейной оптимизации.

В рамках практической реализации предложенного алгоритма необходимо сравнить эти методы оптимизации по двум показателям:

1. *Эффективность алгоритма оптимизации (кВт·ч)*, которая оценивается величиной снижения потерь активной электроэнергии в СЭС.
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.

Предложенный алгоритм позволяет получить оптимальный уровень напряжения в СЭС угольной шахты по критерию минимума потерь активной мощности за счет эффективного использования имеющихся устройств регулирования.

Полученные данные об оптимальном уровне напряжения на шинах ГПП могут быть использованы для задания напряжения поддержания ($U_{под}$) при работе БАР РПН. Алгоритм его работы представлен на рисунке 7.

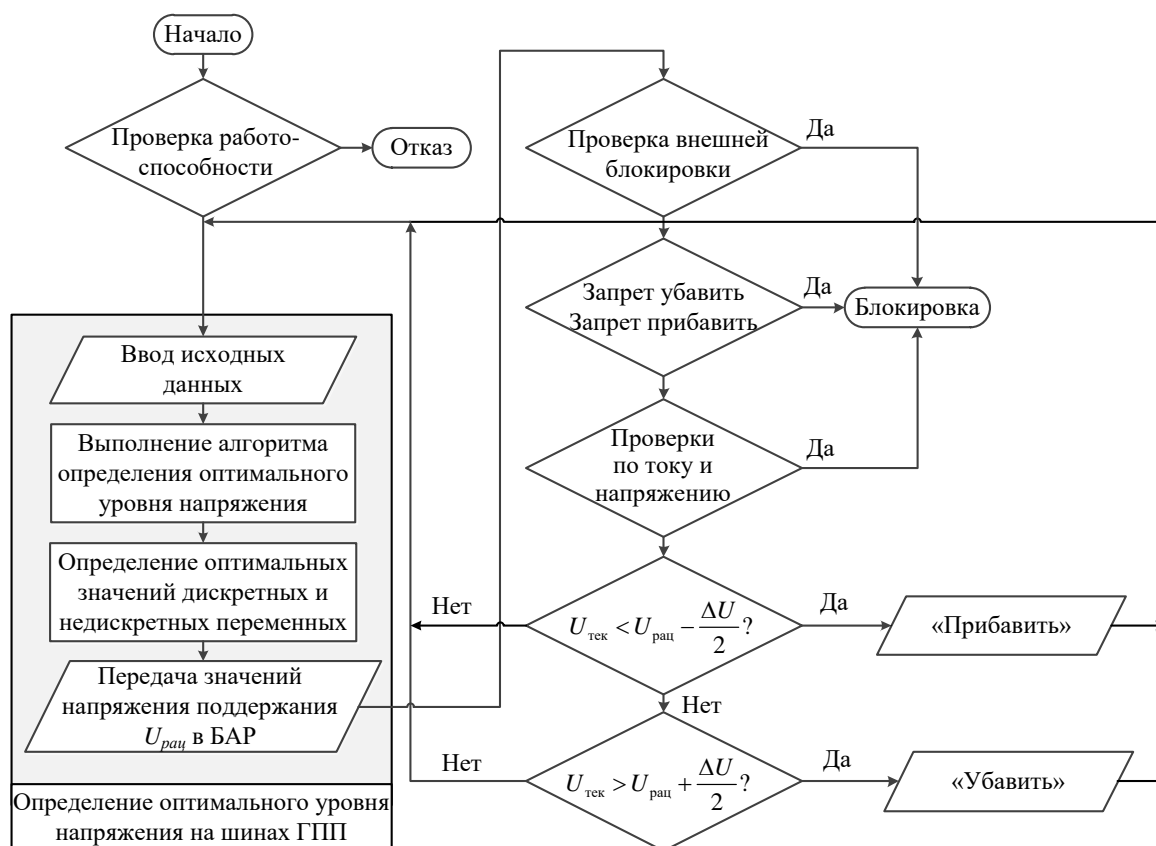


Рисунок 7 – Алгоритм принятия решения регулирующим устройством на задачу управляющего воздействия для регулирования напряжения

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. Кроме того, он позволяет исключить преждевременный износ УРПН.

Четвертая глава посвящена апробации предложенного алгоритма оптимального регулирования напряжения и оценке его эффективности.

Для этого в среде MATLAB была разработана программа для расчета и оптимизации уровня напряжения в СЭС угольной шахты (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018618130, дата приоритета 28.05.2018). В рамках разработанной программы создана имитационная модель тестовой схемы СЭС угольной шахты. Исходная схема электрической сети приведена на рисунке 8. Соответствующая ей имитационная модель представлена на рисунке 9.

В рамках имитационной модели был реализован алгоритм оптимизации уровня напряжения, представленный в главе 3.

В результате было выявлено, что эффективность метода последовательного квадратичного программирования (SQP) и метода внутренней точки находится примерно на одном уровне. Это свидетельствует о том, что при использовании разных алгоритмов могут существовать близкие оптимальные решения при разных значениях дискретных переменных. Однако по второму показателю «Скорость выполнения алгоритма», метод последовательного квадратичного программирования (SQP) оказался почти в 2 раза быстрее (2,5 с. против 4,8 с. у метода внутренней точки). В связи с этим, для дальнейших расчетов был окончательно принят метод последовательного квадратичного программирования (SQP).

Разработанная имитационная модель показала высокую эффективность предложенного алгоритма регулирования напряжения, обеспечив максимально эффективное использование устройств регулирования напряжения и значительное снижение потерь активной мощности. Разработанную модель можно использовать для разработки мероприятий по повышению энергоэффективности СЭС угольных шахт.

Произведенные расчеты показали, что реализация разработанного алгоритма позволит снизить потери активной электроэнергии на 7% и диапазон отклонения напряжения на 4%. При этом экономический эффект от оптимального регулирования напряжения составит 440 тыс. руб. в год. При реализации алгоритма на базе программно-инструментального комплекса SCADA Infinity (внедрен на 9 шахтах Кузбасса), экономический эффект составит около 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.

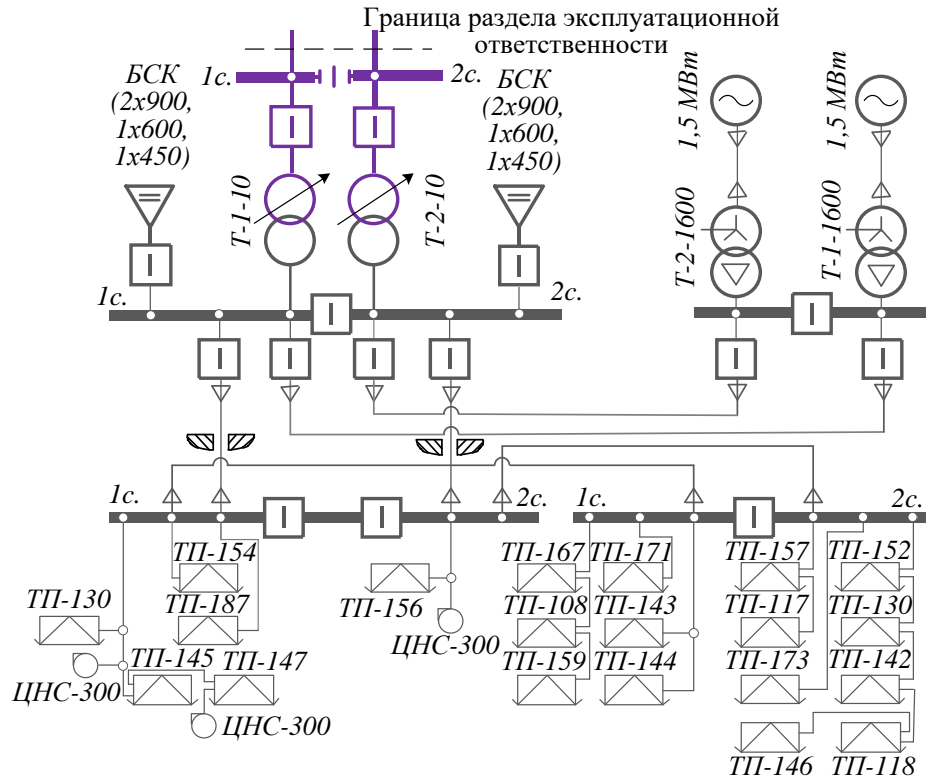


Рисунок 8 – Исходная схема СЭС угольной шахты

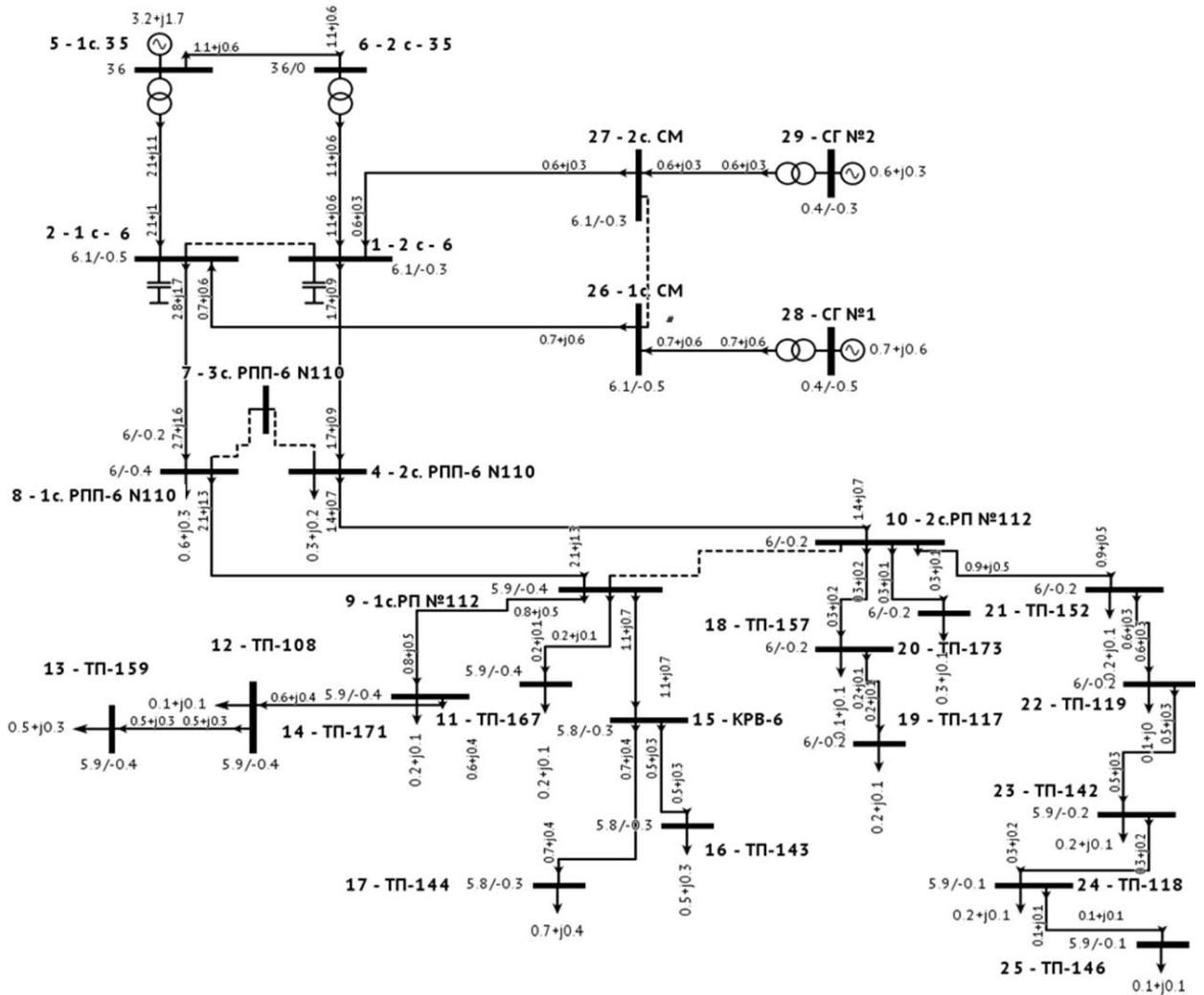


Рисунок 9 – Имитационная модель СЭС угольной шахты

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 $0,95 \div 2,6\%$. 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 ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. 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. – № 2. – С. 116–118.
2. Непша Ф.С. Оценка эффективности оптимизации положений устройств встречного регулирования напряжения на примере электрических сетей филиала ОАО «МРСК Сибири» - «Кузбассэнерго – РЭС / Ф.С. Непша, А.А. Шевченко, В.В. Дабаров // Вестн. Кузбасского гос. тех. унив., 2013. – № 2. – С. 112–115.
3. Непша Ф. С. Особенности регулирования уровня напряжения в системах электроснабжения угольных шахт Кузбасса/ Ф.С. Непша, В.М. Ефременко // Промышленная энергетика, 2017. № 11. – С. 16–21.
4. 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.
5. 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.
6. 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. – № 1. – С. 149–157.

Публикации в изданиях Scopus

7. 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).

Прочие публикации по теме исследования

8. Непша Ф.С. К вопросу создания активно-адаптивной системы регулирования напряжения в распределительных сетях / Ф.С. Непша // Сборник статей по материалам XV международной научно-практической конференции «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс-2014». (6-7 ноября 2014 г., г. Кемерово) – [электронный ресурс] / ФГБОУ ВПО «Куз-

бас. гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева»; редкол.: В.П. Тациенко (отв. редактор), В.А. Колмаков (зам. отв. редактора) [и др.]. – Кемерово, 2014.

9. Непша Ф. С. Анализ методов расчета электрических режимов в рамках системы электроснабжения угольной шахты / Ф. С. Непша, В. М. Ефременко // Интеллектуальные энергосистемы: труды V Международного молодёжного форума, 9-13 октября 2017 г., г. Томск: в 3 т. – Томск : Изд-во ТПУ, 2017. – Т. 3. – С. 83-87.

10. 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.

11. 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.

12. Непша Ф.С. Разработка 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 научно-практической конференция «Экологические проблемы 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.

13. 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» (Нижевартовск, 6 апреля 2018 г.) [электронный ресурс] / ФГБОУ ВО «Нижевартовский государственный университет»; редкол.: А.Ю. Ковалев (отв. ред.) [и др.]. – Нижевартовск: Изд-во Нижеварт. гос. ун-та, 2018. – С. 154 – 160.

14. 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» (24-27 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.

Зарегистрированные программы для ЭВМ

15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018616064. Программа для определения коэффициентов полиномов статических характеристик асинхронных двигателей по напряжению / Ф.С. Непша, В.М. Ефременко; правообладатель ФГБОУ ВО «КузГТУ»; заявл. 05.04.2018; зарегистр. 22.05.2018.

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

[3-6], [10, 12] – разработка идеи публикации, разработка основных теоретических положений, выполнение расчетов;

[1,2], [7-15] – проведение аналитического обзора, построение моделей, проведение вычислительного эксперимента, формулирование выводов.