

На правах рукописи



Воронин Вячеслав Андреевич

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ
МОЩНОСТИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ВЫЕМОЧНЫХ
УЧАСТКОВ УГОЛЬНЫХ ШАХТ

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Кемерово – 2022

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

Научный руководитель

кандидат технических наук
Непша Фёдор Сергеевич

Официальные оппоненты

Герасименко Алексей Алексеевич

доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», профессор
кафедры электроэнергетики

Вильбергер Михаил Евгеньевич

кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»,
декан факультета мехатроники и автоматизации, доцент кафедры электро-
технических комплексов

Ведущая организация

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет»
(г. Санкт-Петербург)

Защита состоится 30 июня 2022 г. в 12:00 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: nepshafs@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:

<https://science.kuzstu.ru/wp-content/docs/OAD/Soresearchers/2022/vor/Dissertation.pdf>

Автореферат разослан «___» мая 2022 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Непша Фёдор Сергеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Несмотря на мировую тенденцию к отказу от углеводородного топлива в пользу более экологически чистых топливно-энергетических ресурсов, спрос на уголь и развитие угольной промышленности сохранится в ближайшие десятилетия.

Существенный рост энерговооруженности горно-шахтного оборудования (ГШО) привёл к росту электропотребления угольных шахт, а увеличение глубины залегания разрабатываемых пластов – к снижению энергетической эффективности угледобычи в результате увеличения потерь электроэнергии при её передаче по протяжённой подземной распределительной сети угольной шахты. Повышение энергоэффективности позволит уменьшить удельное электропотребление на тонну добываемого угля и повысить конкурентоспособность угольной продукции. Это особенно актуально для механизированного комплекса выемочных участков, находящихся на большой глубине и имеющих большую единичную мощность.

Появление на рынке устройств компенсации реактивной мощности (УКРМ) во взрывозащищённом исполнении, в частности высоковольтных конденсаторных установок рудничного исполнения – УКРВ, открывает возможность для разгрузки протяжённой кабельной сети угольной шахты от реактивной мощности при размещении УКРВ под землёй, вблизи основных потребителей реактивной мощности.

Однако ГШО выемочных участков работает в тяжёлых условиях с резкопеременным режимом работы. На электропотребление выемочных участков оказывают влияние горно-геологические условия, технологические параметры горных машин, а также выполняемые технологические операции. Оценка влияния перечисленных факторов на потребление реактивной мощности ГШО является сложной и нерешённой к настоящему времени задачей, в связи с чем проблема выбора мощности, числа ступеней, мест размещения и количества УКРВ в подземной части системы электроснабжения (СЭС) выемочных участков угольных шахт остается нерешённой.

Степень разработанности темы исследования. В работах Ю.С. Железко, Б.И. Кудрина, А.А. Фёдорова, А.А. Губко, М.И. Озерного, Л.А. Плащанского, А.А. Герасименко, Я.Э. Шклярского, М.А.Х. Толба и В.Н. Тульского, Е.А. Третьякова, В.В. Дабарова, Р.В. Беляевского, Kuang Jie, H.F. Bilgin показана целесообразность оптимизации КРМ и учёта неравномерного характера электрических нагрузок. В работах С.С. Кубрина, С.Н. Решетняка и А.М. Бондаренко подчёркивается актуальность снижения энергоёмкости угледобычи. Однако несмотря на значительный объём проведённых исследований, существующие подходы и методики компенсации реактивной мощности (КРМ) не адаптированы для использования в условиях СЭС выемочных участков угольных шахт. В вышеперечисленных работах не были рассмотрены особенности работы ГШО, а также влияние технологического процесса и горно-геологических условий на потребление реактивной мощности электроприводом ГШО.

Цель работы заключается в разработке подходов к выбору рациональной мощности, числа ступеней, количества и мест размещения УКРМ на стадиях проектирования и эксплуатации СЭС выемочных участков угольных шахт.

Идея работы состоит в учёте особенностей технологического процесса угледобычи, горно-геологических условий и неравномерного характера потребления реактивной мощности ГШО при выборе параметров УКРМ.

Основные задачи исследования:

1. Выявить факторы и закономерности, определяющие профиль потребления активной и реактивной мощности электрооборудования выемочного участка угольной шахты.
2. Разработать комплексную имитационную модель СЭС выемочного участка угольной шахты и электроприводов ГШО для моделирования электрической нагрузки СЭС выемочного участка в динамическом режиме работы.
3. Выявить факторы и закономерности, определяющие выбор параметров ступенчатых УКРВ в условиях неравномерных электрических нагрузок.
4. Сформулировать подходы к выбору параметров автоматических ступенчатых УКРВ в СЭС угольных шахт в условиях неравномерных электрических нагрузок.
5. Выполнить оценку эффективности предложенного подхода на примере одной из угольных шахт Кемеровской области.

Научная новизна работы:

1. Впервые выполнен статистический анализ массивов измерений электрических и технологических параметров выемочного участка с очистным комбайном Eickhoff SL 900, результаты которого использованы для формирования типового сценария рабочей смены выемочного участка.
2. Предложен подход к выбору мощности ступеней автоматических УКРВ с помощью методов оптимизации на основе гистограммы частот результатов измерения потребляемой реактивной мощности, не требующий имитационного моделирования.
3. Разработана комплексная имитационная модель СЭС выемочного участка и электроприводов ГШО, отличающаяся от известных тем, что: объединяет все основные горные машины и СЭС в рамках одной общей модели; учитывает особенности технологического процесса и характера электропотребления горных машин; учитывает работу автоматических ступенчатых УКРВ.
4. Предложен подход к выбору параметров автоматических ступенчатых УКРВ на основе оптимизации параметров УКРВ имитационной модели, отличающийся от существующих тем, что учитывает особенности технологического процесса выемочного участка и неравномерный характер электрических нагрузок горных машин.

Теоретическая и практическая значимость. Предложенный подход к разработке мероприятий по КРМ с учётом динамического характера электри-

ческих нагрузок может быть использован для повышения энергоэффективности СЭС угольных шахт, проведённые исследования характера электрических нагрузок ГШО могут быть использованы для прогнозирования электрических нагрузок угольных шахт и для актуализации расчётных коэффициентов графиков электрических нагрузок для повышения точности определения расчётной мощности. Полученные результаты могут быть распространены на другие предприятия минерально-сырьевого комплекса.

Результаты работы могут быть рекомендованы для использования в проектной деятельности и использованы при актуализации нормативно-технических документов по проектированию СЭС угольных шахт.

Методология и методы исследования. При выполнении диссертационной работы для решения поставленных задач и обеспечения достоверности результатов применялись: теоретические основы электротехники и электромеханики; известные методики расчёта усилий резания и подачи на резцах и усилий в звеньях тягового органа скребкового конвейера; компьютерное имитационное моделирование; методы оптимизации; методы математической статистики; методы объектно-ориентированного программирования.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Имитационная модель СЭС выемочного участка угольной шахты для выбора мощности, числа ступеней, количества и мест размещений УКРВ должна учитывать горно-геологические условия и особенности режимов работы ГШО.

2. Выбор мощности, числа ступеней, количества и мест размещений УКРВ определяется протяжённостью кабельной линии от поверхности до передвижных участков подземных подстанций, коэффициентом загрузки электроприводов ГШО и размахом изменения потребляемой реактивной мощности.

3. Предложенные подходы, учитывающие неравномерный характер электропотребления, особенности технологического процесса работы ГШО и горно-геологические условия, позволяют определить рациональную мощность, число ступеней, количество и места размещения УКРВ.

Достоверность научных положений и выводов, сформулированных в диссертационной работе, обеспечивается: соответствием величин, полученных с помощью имитационного моделирования, с результатами измерений токовой нагрузки; использованием апробированного программного обеспечения.

Личный вклад автора заключается в выполнении основного объёма 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. Анализ научно-технической проблемы КРМ в СЭС выемочных участков угольных шахт (глава 1) и имитационное моделирование электропривода очистного комбайна (глава 2)

выполнены при поддержке Гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских учёных № МК-236.2020.8, имитационное моделирование электроприводов скребкового конвейера, перегружателя и дробилки (глава 2), разработка подходов к выбору параметров УКРВ (глава 3) и апробация предложенных подходов (глава 4) выполнены при поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ 075-03-2021 138/3). 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 в ООО «СофтКАТЭН».

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на конференциях: Научно-практический угольный форум НОЦ «Кузбасс», Кемерово, 2020 г.; Всероссийская научно-практическая конференция «Энергетика и энергосбережение: теория и практика», Кемерово, 2020-2021 гг.; Международная конференция 2020 Ural Smart Energy Conference (USEC), Екатеринбург, 2020 г; Международный научный симпозиум «Неделя горняка-2021», Москва, 2021 г.; Международный инновационный горный симпозиум, Кемерово, 2021 г.; Всероссийская научно-практическая конференция молодых учёных «Россия Молодая», Кемерово, 2021 г.; Международная научно-практическая конференция «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2021», Санкт-Петербург, 2021 г.; Шестой Международный Инновационный Горный Симпозиум, Кемерово, 2021 г.; Ural-Siberian Smart Energy Conference (USSEC 2021), Новосибирск, 2021 г.; Всероссийская Молодежная Научно-Практическая Конференция «Энергостарт», Кемерово, 2021 г.; 2021 IEEE 15th International Conference Of Actual Problems Of Electronic Instrument Engineering (APEIE), Новосибирск, 2021 г.

Публикации. Общее количество публикаций по теме диссертационной работы – 18 печатных работ, 4 из которых – в ведущих журналах, рекомендованных списком ВАК, 9 – в журналах и трудах научных конференций, индексируемых в международных базах Web of Science, Scopus, 7 – в материалах и трудах всероссийских и международных научных конференций, 1 – результат интеллектуальной деятельности.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы из 114 наименований. Работа изложена на 194 страницах машинописного текста и содержит 86 рисунков, 23 таблицы и 4 приложения.

Автор выражает благодарность сотрудникам кафедры Электроснабжения горных и промышленных предприятий КузГТУ, а также лично д.т.н. Лебедеву Г.М. за поддержку, оказанную при работе над диссертацией.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе выполнен анализ состояния проблемы компенсации реактивной мощности в СЭС выемочных участков угольных шахт.

По результатам анализа литературных источников был сделан вывод о том, что существующие подходы к КРМ в СЭС угольных шахт не учитывают неравномерный характер электропотребления ГШО, а также особенности их технологического процесса.

Среди управляемых УКРМ, пригодных для эксплуатации в подземных условиях угольных шахт, могут быть использованы ступенчатые конденсаторные установки рудничного исполнения – УКРВ с контроллером реактивной мощности. Однако в настоящее время методика выбора мощности, числа ступеней, количества и мест размещения УКРВ в условиях неравномерных электрических нагрузок не изучена в достаточной степени.

Для исследования характера электропотребления выемочных участков современных угольных шахт был выполнен статистический анализ массивов измерений электрических и технологических параметров, накопленных SCADA в СЭС выемочного участка одной из угольных шахт Кемеровской области. Исследуемый выемочный участок оснащен одним из самых мощных очистных комбайнов в угольной отрасли России – Eickhoff SL 900. Массивы данных содержат измерения за период в 72 дня.

На основе результатов обработки измерений было установлено, что среднее время работы комбайна в течение смены составляет 266,1 мин, что соответствует среднему значению коэффициента машинного времени в 0,55. Сводные результаты анализа рабочей смены очистного комбайна приведены на рисунке 1.

Существенное влияние на электропотребление комбайна оказывает скорость подачи. С ростом скорости подачи возрастает потребляемая активная мощность. В рабочем режиме комбайна наблюдается более резкое увеличение активной мощности при увеличении скорости подачи, чем в маневровом режиме работы (рисунок 2, а). Между скоростью подачи и активной мощностью в рабочем режиме наблюдается средний уровень корреляции ($R = 0,63$), а в маневровом режиме – сильный ($R = 0,80$). Меньшая степень корреляции в рабочем режиме может являться следствием существенного разброса значений активной мощности из-за случайного характера изменения сопротивления разрушаемого угольного пласта. При возрастании скорости подачи комбайна также наблюдается увеличение производительности выемочного участка (рисунок 2, б). Степень корреляции средняя ($R = 0,55$ – в рабочем режиме; $R = 0,42$ – в маневровом режиме).

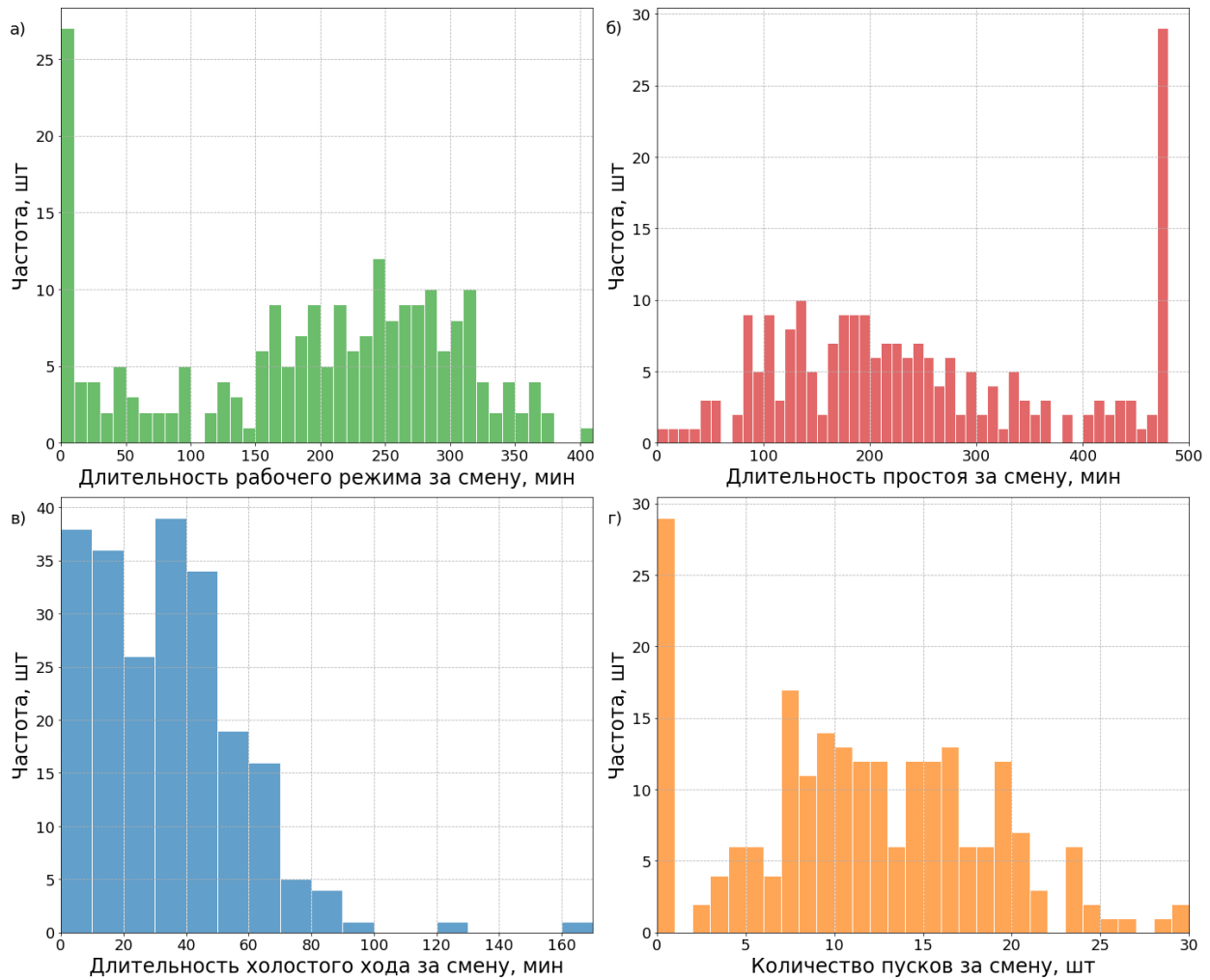


Рисунок 1. Гистограммы частот: а) времени рабочего режима; б) времени простоя; в) длительности холостого хода; г) количества пусков в течение рабочей смены

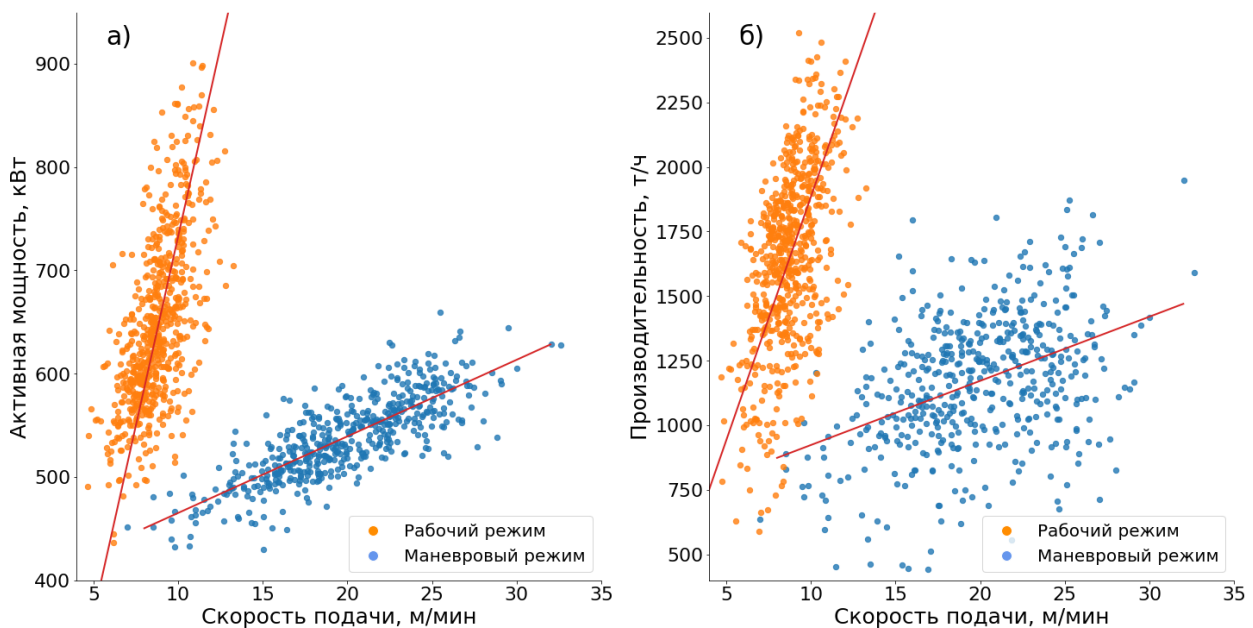


Рисунок 2. Диаграмма рассеяния скорости подачи комбайна с потребляемой активной мощностью (а) и производительностью выемочного участка (б)

График токовой нагрузки привода резания очистного комбайна существенно неравномерный. Работа очистного комбайна сопровождается частыми остановкам и пусками. В течение рабочего хода потребляемый электроприводом ток варьируется в достаточно широких пределах, что обусловлено как технологическими условиями работы, так и влиянием множества случайных факторов на нагруженность электропривода резания. Коэффициент формы графика токовой нагрузки обоих приводов резания в среднем составляет 0,28. С ростом средней скорости подачи наблюдается увеличение математического ожидания и стандартного отклонения токовой нагрузки привода резания ($R = 0,57$).

На основании результатов измерений и паспортных параметров электропривода была выполнена оценка реактивной мощности, потребляемой очистным комбайном и скребковым конвейером. Реактивная мощность очистного комбайна изменяется в пределах 0,12...0,80 ($P = 0,99$) номинального уровня, при средней величине в 0,78 и медиане в 0,67. Лавный конвейер имеет размах изменения реактивной мощности в пределах 0,75...0,98 ($P = 0,99$) номинального уровня, при средней величине в 0,80 и медиане в 0,77 (рисунок 3).

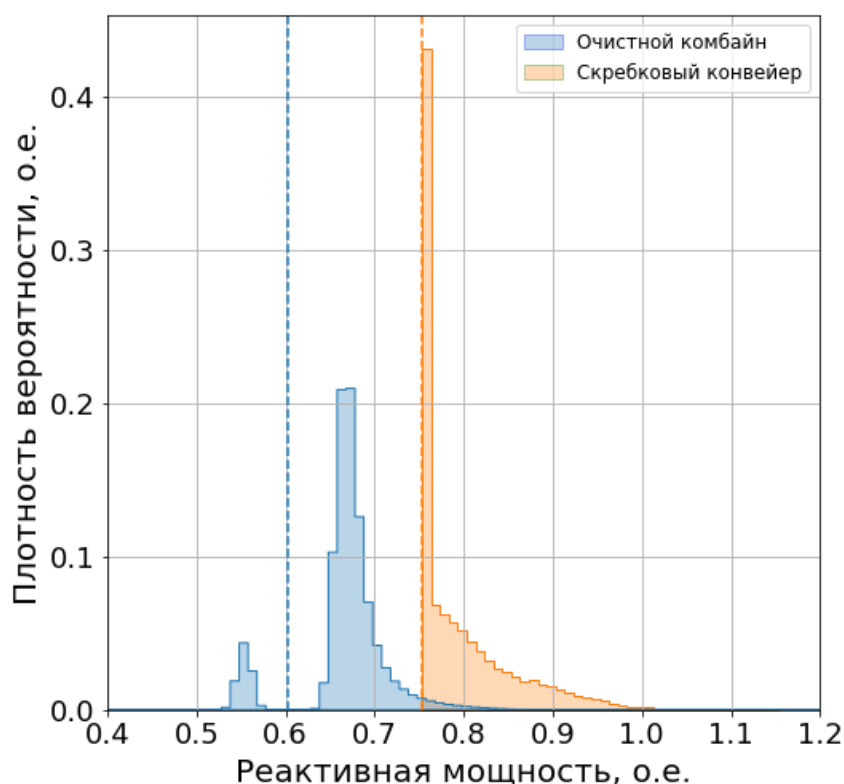


Рисунок 3. Гистограмма частот потребляемой реактивной мощности электроприводами очистного комбайна и лавного конвейера

Проведённый анализ позволил сделать следующие выводы:

1. Характер потребляемой реактивной мощности электроприводами ГШО зависит от горно-геологических условий, текущих технологических параметров рабочего режима, а также от множества случайных факторов. Совокупное воздействие указанных причин приводит к колебанию реактивной

мощности комбайна в пределах $0,18 \cdot Q_{\text{ном}}$ ($P = 0,95$), согласно результатам измерений.

2. Режим работы современного очистного комбайна значительно отличается от режима работы комбайнов, используемых 1960-1970-е гг., и характеризуется существенно большим коэффициентом машинного времени и продолжительностью включения (ПВ). Это свидетельствует о том, что общепринятые подходы к оценке расчётных электрических нагрузок выемочных участков, формировавшиеся в 60-80-е гг. XX в., являются устаревшими и не могут быть использованы для решения рассматриваемой научно-технической задачи.

3. В связи с использованием средств взрывозащиты, стоимость УКРВ превышает стоимость УКРМ общепромышленного исполнения в 26 и более раз.

Вторая глава посвящена разработке имитационной модели СЭС выемочного участка и электроприводов ГШО.

Рассматриваемая имитационная модель должна обладать следующими свойствами:

- учёт динамического характера изменения электрической нагрузки;
- интеграция отдельных моделей горных машин в общую имитационную модель выемочного участка;
- учёт особенностей технологического процесса выемочного участка;
- учёт системы автоматического управления УКРМ.

Анализ литературы показал, что существующие модели не позволяют оценить энергоэффективность СЭС очистного забоя в динамических режимах работы горных машин. В связи с вышесказанным, требуется разработка имитационных компьютерных моделей электротехнического комплекса выемочных участков, позволяющих оценить режим работы СЭС при резко-переменном характере электрических нагрузок и эффективность мероприятий по КРМ. В качестве среды для имитационного моделирования выбран Matlab – Simulink.

Имитационная модель СЭС включает в себя центр питания 35 кВ, силовой трансформатор главной поверхностной подстанции шахты, высоковольтную кабельную сеть 6 кВ, силовые трансформаторы ПУПП, высоковольтные выключатели.

Имитационная модель электропривода очистного комбайна состоит из электрической части, включающей в себя асинхронные электродвигатели, гибкие кабели 3,3 кВ и механическую часть, формирующую момент сопротивления для электропривода резания и подачи. Момент сопротивления рассчитывается через силу резания исполнительного органа $Z_{\text{ио}}$, которая определяется по конструктивно-технологическим параметрам комбайна, скорости резания V_r и скорости подачи $V_{\text{п}}$, горно-геологическим условиям для текущего положения угла поворота шнека $\varphi_{\text{ш}}$ в соответствии с ОСТ 12.44.258-84. Механическая часть модели очистного комбайна представлена в подсистеме «Исполнительный орган» на рисунке 4, поз. 1.

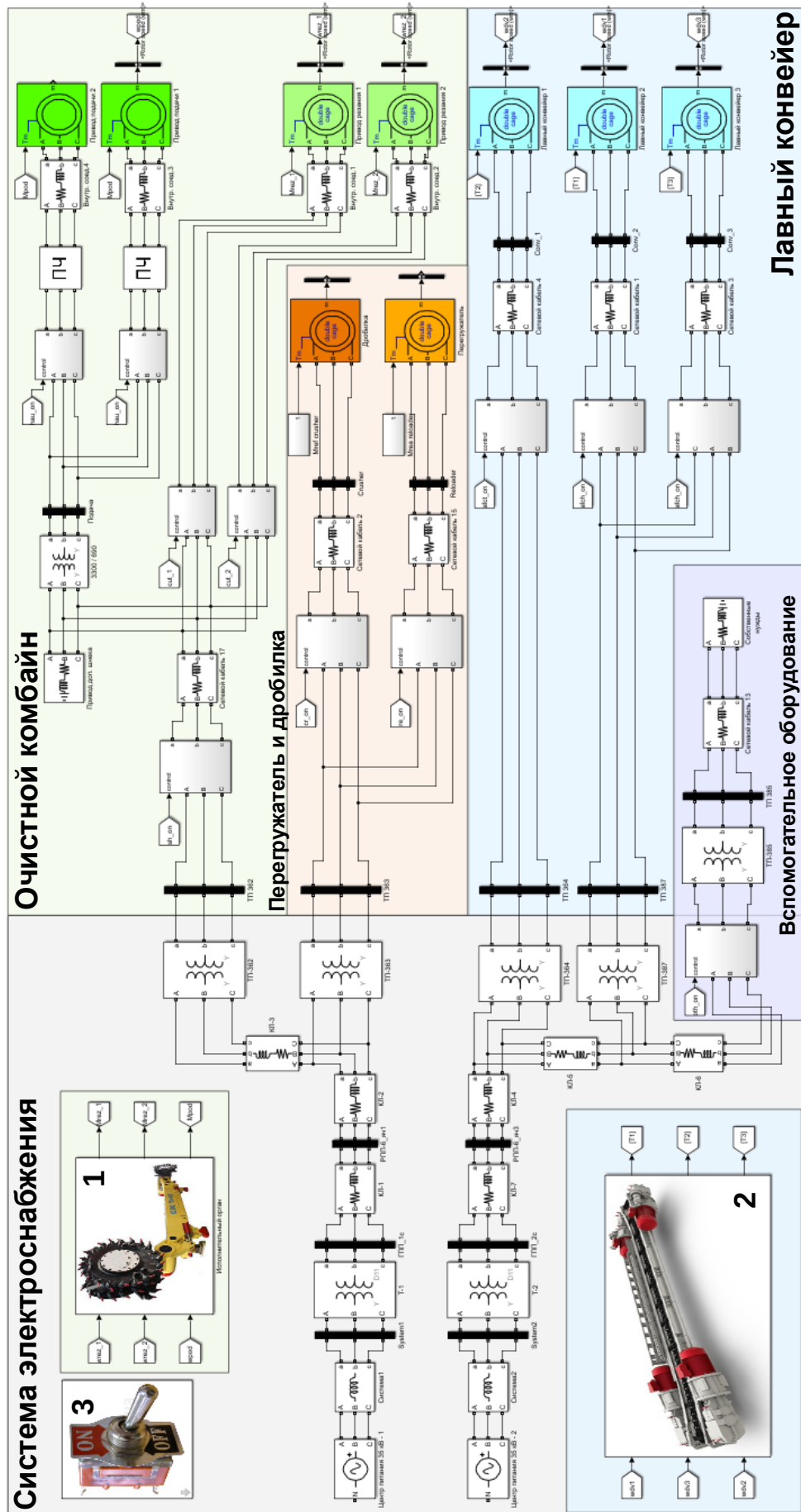


Рисунок 4. Имитационная модель СЭС выемочного участка

Для настройки стохастической модели формирования сопротивляемости угля резанию были использованы методы оптимизации из пакета Global Optimization Toolbox в программной среде Matlab.

В ходе оптимизации были подобраны такие параметры модели, при которых обеспечиваются минимальные отклонения между результатами моделирования и результатами измерения токовой нагрузки привода резания очистного комбайна. Результаты верификации модели показали, что отклонение по среднему значению, медиане и стандартному отклонению токовой нагрузки не превышают 1 %.

Для реализации имитационной модели электропривода скребкового конвейера использован подход, согласно которому тяговый орган конвейера представляется совокупностью элементарных динамических звеньев. Решение системы уравнений движения для тягового органа конвейера позволяет получить величину момента сопротивления для головного и хвостового приводов. Механическая часть имитационной модели лавного конвейера представлена в подсистеме «Тяговый орган» на рисунке 4, поз. 2. Электрическая часть модели включает в себя асинхронные электродвигатели и гибкие кабели 3,3 кВ.

Полная схема разработанной комплексной имитационной модели СЭС выемочного участка и электроприводов ГШО объекта исследования приведена на рисунке 4 и включает в себя модели: главной поверхностной подстанции шахты 35/6 кВ; высоковольтной кабельной сети 6 кВ; электропривода очистного комбайна, лавного конвейера, перегружателя и дробилки.

Разработанная модель автоматической ступенчатой конденсаторной установки включает в себя батареи статических конденсаторов и контроллер реактивной мощности. Контроллер реактивной мощности имеет следующий набор параметров: $Q_{\min}$ – наименьший шаг реактивной мощности (квар), равный реактивной мощности наименьшей ступени; $T_{\text{разряд}}$ – время блокировки ступени после отключения (минимальное время, требуемое для того, чтобы конденсатор разрядился), с; $T_{\text{вкл}}$ – время задержки контроллера по отработке значения реактивной мощности, равной наименьшему шагу, с; $Q_{\text{ст}}$ – массив номинальных мощностей ступеней УКРВ, квар; Step – количество ступеней УКРВ; $\cos\varphi_{\text{on}}$, $\cos\varphi_{\text{off}}$ – уставки включения и отключения ступени по коэффициенту мощности. Контроллер реактивной мощности управляет коммутацией ступеней конденсаторной установки с целью поддержания заданного коэффициента мощности. Алгоритм работы контроллера приведён на рисунке 5.

Для моделирования работы СЭС выемочного участка использован сценарный подход, предусматривающий выделение типовых режимов работы:

Пусковой режим. Данный сценарий предусматривает последовательный запуск всех горных машин в следующей последовательности: дробилка; перегружатель; лавный конвейер (пуск хвостового привода и головного привода с интервалом в 1,5 сек); очистной комбайн.

Рабочий режим. Данный сценарий моделирует зарубку и рабочий ход очистного комбайна. Порядок взаимодействия и формирования нагрузки моделей отдельных горных машин в рабочем режиме описан на рисунке 6.

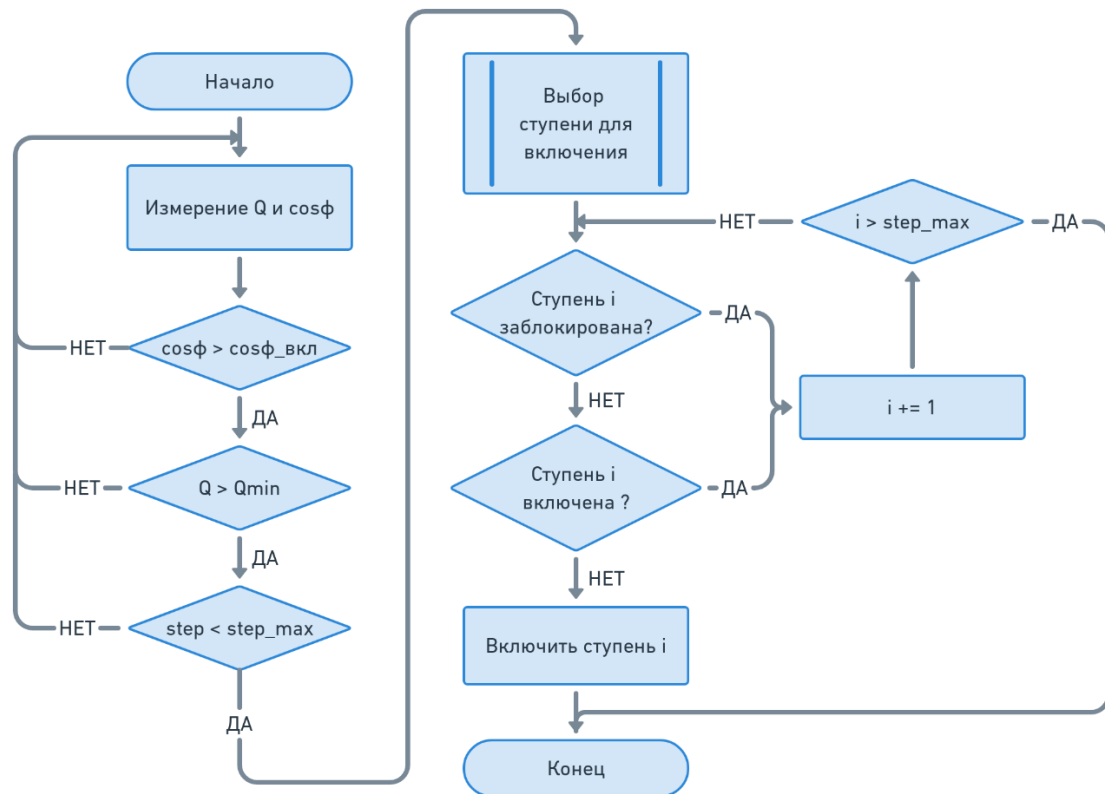


Рисунок 5. Блок-схема алгоритма формирования управляющего воздействия на включение ступени УКРВ

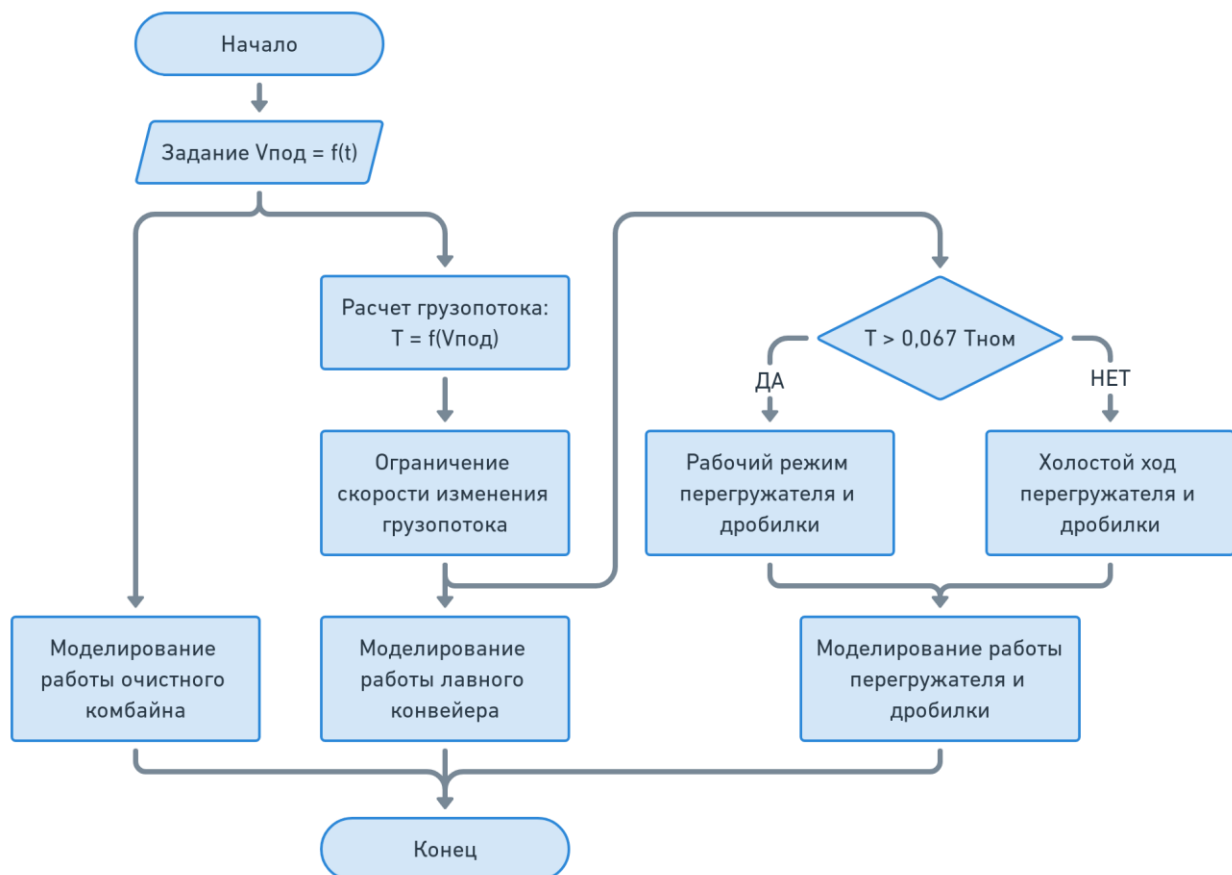


Рисунок 6. Блок-схема совместного режима работы горных машин выемочного участка

Холостой ход. Данный сценарий соответствует работе горных машин при отсутствии подачи очистного комбайна – привод всех горных машин работает на холостых оборотах.

Разработанная комплексная имитационная модель СЭС выемочного участка, электроприводов ГШО и автоматической ступенчатой УКРВ позволяет моделировать электрические нагрузки выемочного участка в динамических режимах работы с учётом технологических параметров ГШО, горно-геологических условий и влияния случайных факторов.

Третья глава посвящена разработке подходов к выбору параметров УКРВ в СЭС выемочных участков угольных шахт.

На основании проведённого итерационного моделирования величины экономического эффекта от КРМ при изменении параметров СЭС выемочного участка, мощности, количества ступеней и мест размещения УКРВ установлено, что выбор рациональных параметров УКРВ определяется как параметрами СЭС, так и особенностями режимов работы ГШО. На рисунке 7 показаны трёхмерные графики величины чистого дисконтированного дохода (NPV) при использовании двухступенчатой УКРВ для КРМ очистного комбайна при различных значениях коэффициента загрузки $K_{зг}$ его электропривода.

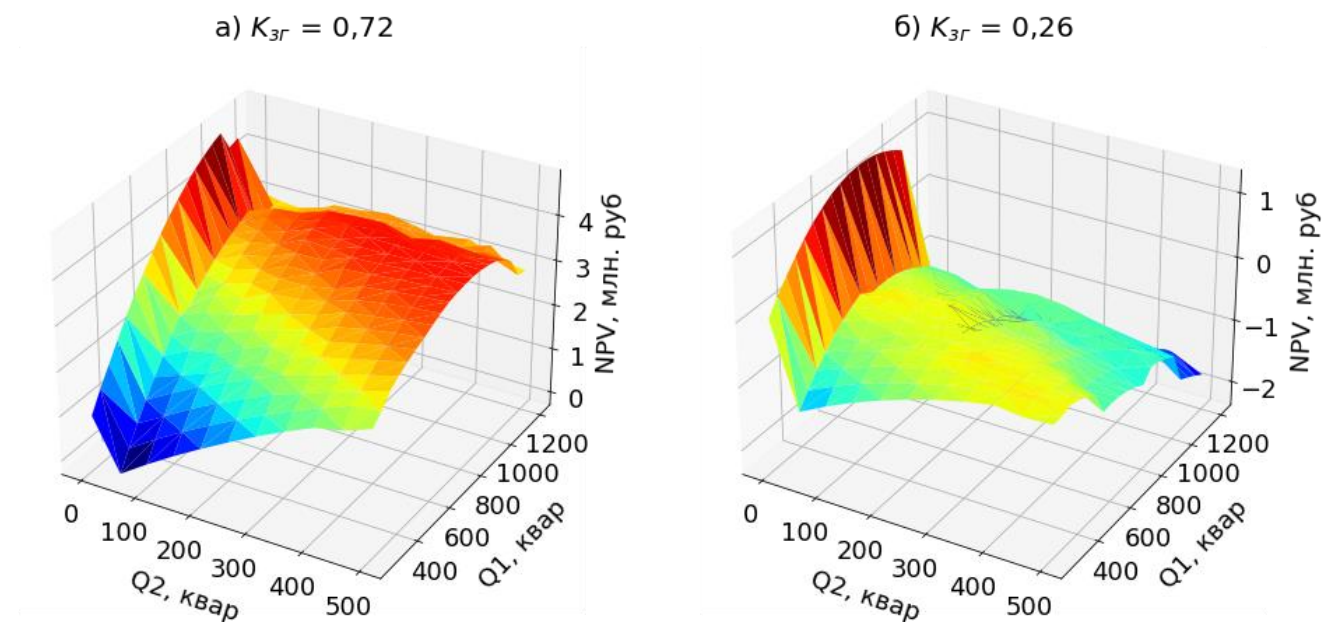


Рисунок 7. Трёхмерные графики зависимости мощности ступеней двухступенчатой УКРВ от величины NPV

Как следует из представленных зависимостей (рисунок 7), наибольший экономический эффект наблюдается при мощности второй ступени УКРВ $Q2 = 0$, т.е. для одноступенчатой УКРВ. При увеличении мощности второй ступени $Q2$ величина NPV резко снижается, что связано с высокой постоянной составляющей стоимости УКРВ, что также объясняет малый NPV в области малых значений $Q1$. По мере увеличения мощности второй ступени $Q2$ УКРВ

экономический эффект возрастает, однако, это наблюдается только при достаточно большой величине $K_{зг}$, т.к. в этом случае размах изменения реактивной мощности достаточно велик, чтобы обеспечить высокий коэффициент использования дополнительной ступени. При малом $K_{зг}$ характер изменения реактивной мощности равномерный и ввод дополнительной ступени слабо сказывается на повышении эффективности КРМ.

На основании обобщения результатов анализа были сформулированы три подхода к выбору параметров УКРВ, алгоритм которых приведен на рисунке 8:

- а) подход на основе имитационного моделирования;
- б) подход на основе использования результатов измерений;
- в) подход на основе аналитической оценки.

В качестве целевой функции оптимизации параметров УКРВ предложено использовать величину чистого дисконтированного дохода:

$$OF = NPV_T \rightarrow \max, \quad (1)$$

$$\max OF(Q) \text{ при } \begin{cases} 0 \leq Q_{\text{осн}} \leq Q_{\text{осн.макс}}; \\ 0 \leq Q_{\text{доп}} \leq Q_{\text{доп.макс}}; \\ (\sum Q)_{\min} \leq \sum Q \leq (\sum Q)_{\max}, \end{cases} \quad (2)$$

где T – период времени для расчёта NPV (следует принимать в зависимости от требуемого срока возврата инвестиций), лет; $Q_{\text{осн}}$ – реактивная мощность основной ступени УКРВ, квар; $Q_{\text{доп}}$ – реактивная мощность дополнительных ступеней УКРВ (вторая и последующие), квар; $\sum Q$ – суммарная мощность ступеней всех УКРВ, квар. Расчёт NPV выполняется по выражениям:

$$NPV_T = \sum_{t=1}^T \left(\frac{CF_t}{(1+E)^{t-1}} - IC \right), \quad (3)$$

$$IC = C_{PFC} - \Delta C_{PG}, \quad (4)$$

$$CF_t = \Delta C_{\text{energy}} - OC_{PFC}, \quad (5)$$

где CF_t – денежный доход за год t , руб; IC – инвестиции в КРМ, руб; E – норма дисконта, о.е.; C_{PFC} – капитальные затраты на УКРМ и УКРВ, руб; ΔC_{PG} – разница между капитальными затратами на электросетевое оборудование подземной распределительной сети угольной шахты при учёте и без учёта КРМ, руб; ΔC_{energy} – разница в величине годовой платы за электроэнергию и мощность угольной шахты до и после КРМ, руб; OC_{PFC} – годовые эксплуатационные расходы на обслуживание УКРМ (УКРВ), руб.

При расчёте NPV параметр ΔC_{PG} имеет значение только при выполнении оптимизации на этапе проектирования СЭС выемочных участков. При оптимизации параметров УКРВ на этапе эксплуатации $\Delta C_{PG} = 0$, т.к. электросетевое оборудование подземной распределительной сети угольной шахты остаётся без изменений.

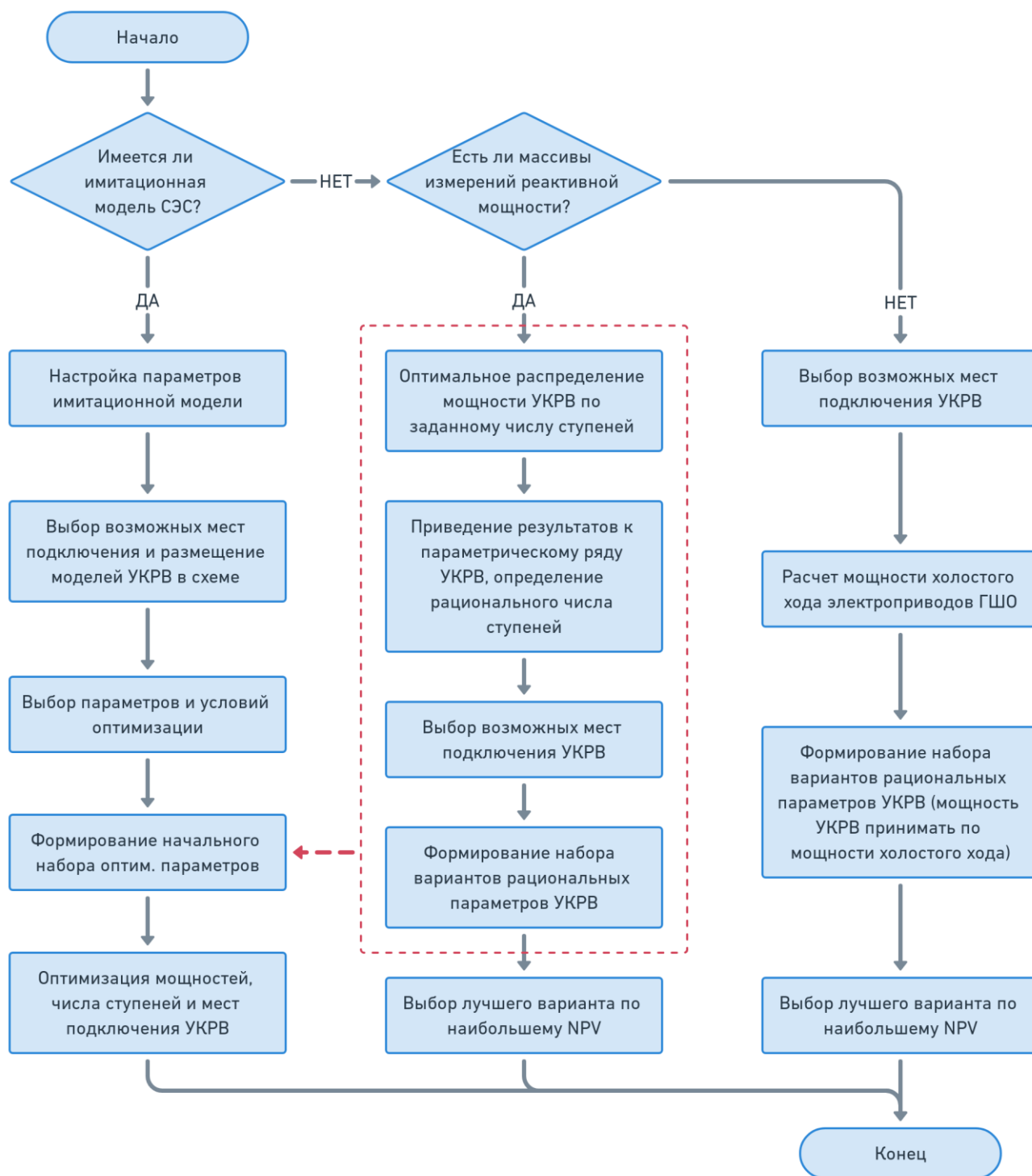


Рисунок 8. Алгоритм предложенных подходов к выбору параметров УКРВ

Моделирование работы СЭС выемочного участка занимает длительное время, поэтому применение традиционных методов оптимизации, предусматривающих выполнение большого числа итераций, не представляется возможным, в связи с высокой длительностью выполнения такого расчёта. Для выбора подходящего метода оптимизации был выполнен сравнительный анализ различных алгоритмов, в число которых входят: метод роя частиц, генетиче-

ский алгоритм, метод прямого поиска, имитация отжига и оптимизация с использованием суррогатных моделей. По результатам анализа было установлено, что при ограниченном количестве возможных итераций лучший результат может быть получен с помощью оптимизации с использованием суррогатных моделей (ОСМ) при рациональном выборе начального набора значений оптимизируемых параметров.

Для формирования начального набора значений оптимизируемых параметров ОСМ предложено проведение предварительной упрощённой оптимизации, суть которой заключается в оптимальном распределении реактивной мощности по ступеням УКРВ на основе гистограммы частот потребляемой реактивной мощности, полученной из результатов измерений или моделирования. Реализация данного алгоритма выполнена с использованием генетического алгоритма оптимизации (Программа для ЭВМ № 2021669862 «Программа для выбора оптимальной конфигурации многоступенчатой конденсаторной установки на очистных участках угольных шахт»).

Архитектура программной реализации предложенного алгоритма для выбора оптимальных параметров УКРВ приведена на рисунке 9.

Четвертая глава посвящена апробации предложенных подходов к выбору мощности, числа ступеней, мест размещения и количества УКРВ на примере одной из угольных шахт Кемеровской области (рисунок 10).

Для выбора оптимальных параметров УКРВ была разработана комплексная имитационная модель СЭС и электроприводов ГШО рассматриваемого выемочного участка (рисунок 4). Анализ КРМ выполнен на этапе проектирования и эксплуатации выемочного участка на основе использования:

- а) методов имитационного моделирования и оптимизации;
- б) результатов измерения и оптимизации;
- в) паспортных параметров электропривода.

Результаты определения экономического эффекта (NPV) и дисконтированного срока окупаемости инвестиций (DPP) в УКРВ, параметры которых были определены в соответствии с предложенными подходами, а также выбранные мощности и места размещения УКРВ приведены в таблицах 1 и 2.

Как следует из таблицы 1, использование УКРВ в подземной части угольных шахт обладает высокой экономической эффективностью и может обеспечить NPV до 3,63...25,59 млн. руб за срок службы УКРВ при сроке окупаемости в 0...10 лет. Использование ОСМ для оптимизации параметров УКРВ в имитационной модели СЭС выемочного участка угольной шахты на 7...20 % более эффективно по сравнению с подходами, не предусматривающими использование имитационной модели.

Как следует из таблицы 2, наиболее экономически эффективным вариантом размещения УКРВ является комбинация групповой и индивидуальной КРМ, когда часть мощности располагается на шинах РПП, а часть – на стороне НН ПУПП. Кроме того, на этапе эксплуатации алгоритм ОСМ позволяет получить лучший экономический эффект при меньшей реактивной мощности УКРВ по сравнению с другими подходами.

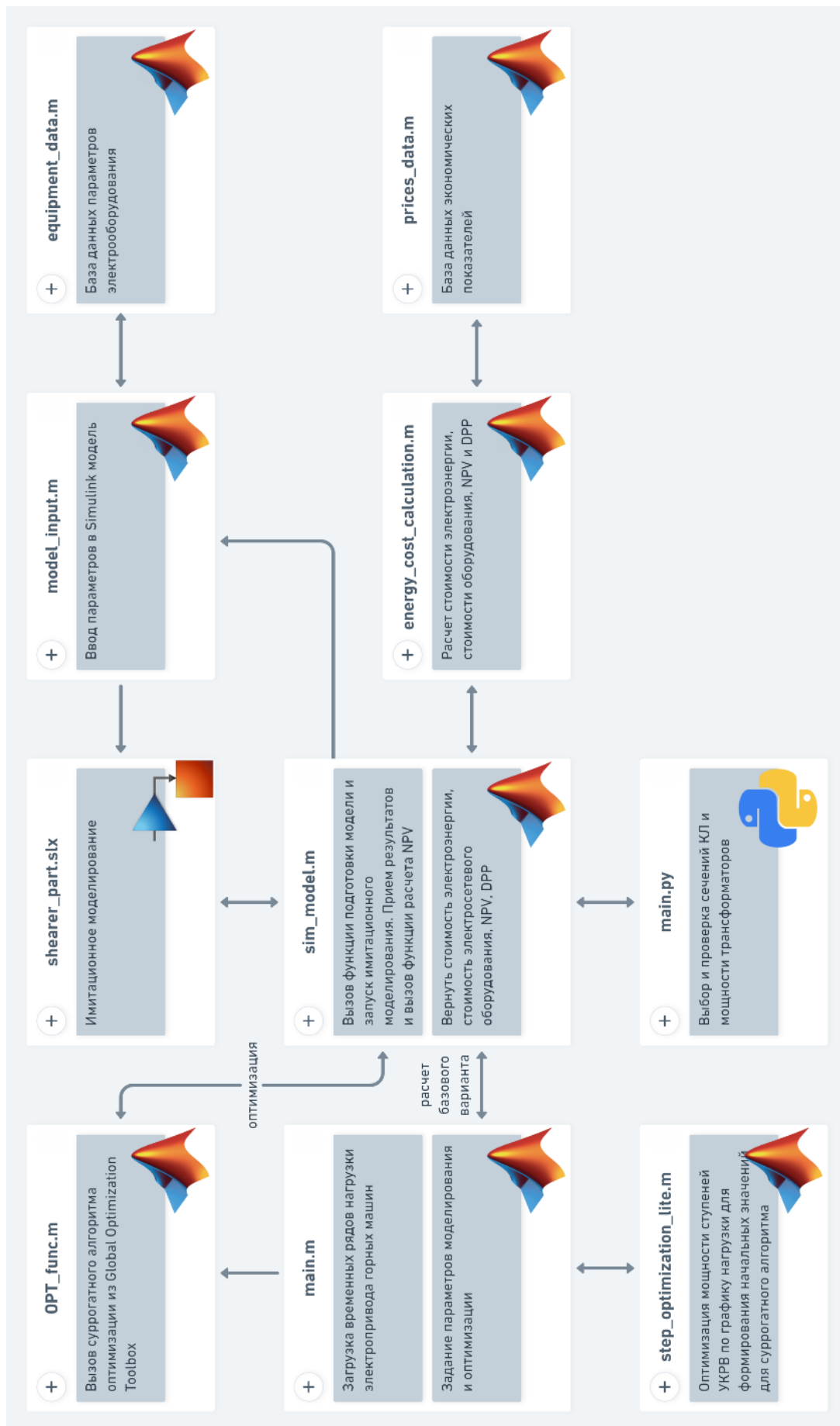


Рисунок 9. Структурная схема взаимодействия отдельных программных модулей при выполнении оптимизации

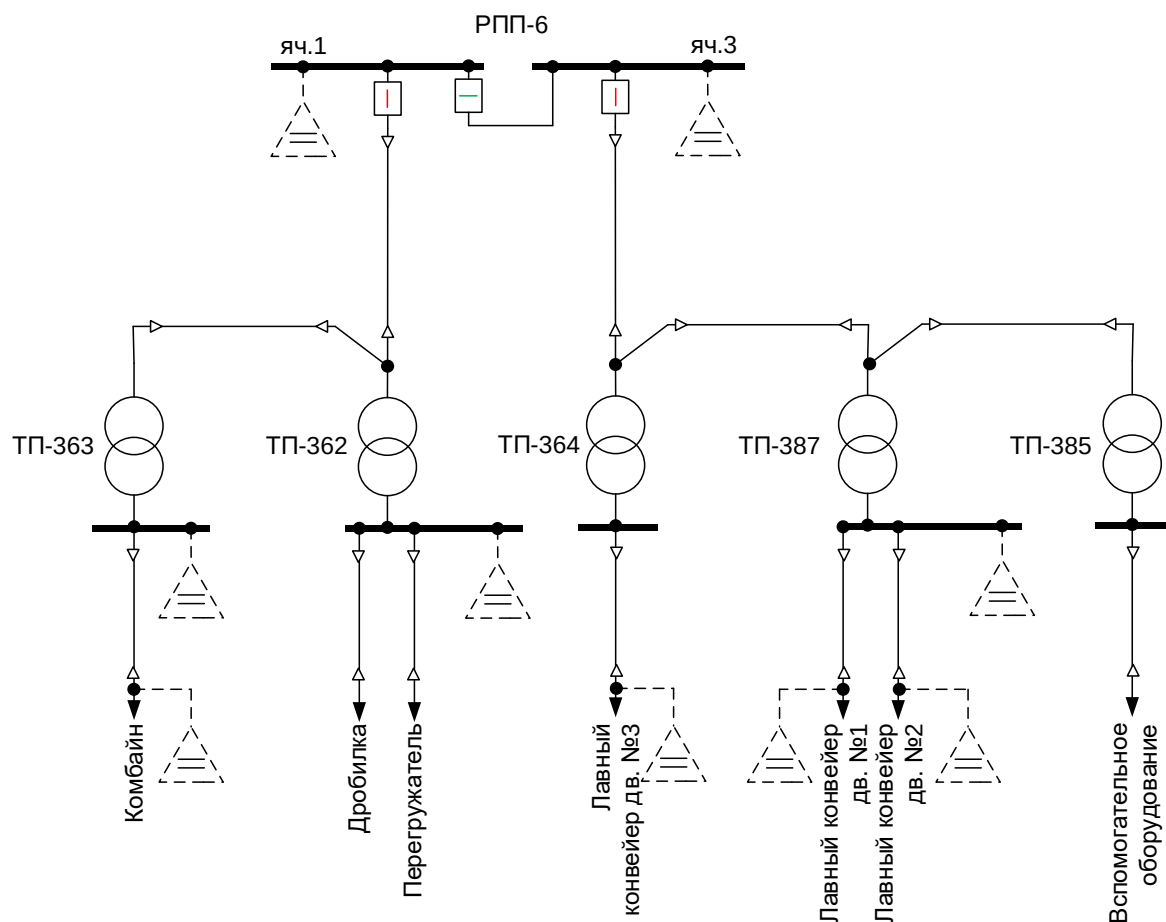


Рисунок 10. Участок СЭС выемочного участка с указанием рассматриваемых мест размещения УКРВ

Таблица 1. Сравнение рассмотренных подходов к выбору параметров УКРВ

Подход	Этап реализации	NPV, млн.руб	DPP, лет
а) имитационное моделирование + оптимизация	эксплуатация	4,5475	9
	проектирование	25,5959	0*
б) измерение реактивной мощности + оптимизация	эксплуатация	3,6365	10
	проектирование	23,7837	0*
в) использование паспортных параметров электропривода	эксплуатация	3,6365	10
	проектирование	22,9305	0*

Примечание – * Окупаемость УКРВ происходит сразу, т.к. снижение капитальных затрат на электросетевое оборудование превышает стоимость УКРВ.

Таблица 2. Наиболее экономически эффективные варианты компоновки УКРВ

Место подключения	Варианты компоновки УКРВ по рассмотренным подходам					
	этап эксплуатации			этап проектирования		
	а)	б)	в)	а)	б)	в)
РПП-6 яч.1	-	900	900	-	-	-
РПП-6 яч.3	1200	1350	1350	1200	-	-
ТП-362	-	-	-	-	500+100	600
ТП-363	550	-	-	550	300	300
ТП-364	-	-	-	-	450	450
ТП-387	-	-	-	550	900+50	900

На основании проведённых исследований могут быть сформулированы следующие области применения предложенных подходов к выбору параметров УКРВ:

подход а) – на любом этапе работы угольной шахты при наличии комплексной имитационной модели СЭС;

подход б) – на этапе эксплуатации угольной шахты при наличии достаточного объёма результатов измерений;

подход в) – во всех остальных случаях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации содержится решение научной задачи повышения энергоэффективности СЭС выемочных участков угольных шахт с применением автоматических ступенчатых УКРВ, имеющей существенное значение для развития угледобывающей промышленности Российской Федерации.

На основании проведённых исследований получены следующие результаты:

1. Установлено, что в связи с ростом производительности и энерговооруженности ГШО, увеличением длин лав и неравномерным характером электропотребления принятые подходы к определению электрических нагрузок не могут быть использованы для оценки эффективности работы УКРВ, что подтверждается существенными отличиями режимных параметров современного очистного комбайна Eickhoff SL 900 от советских аналогов (2K52, 1K101).

2. Разработана комплексная имитационная модель СЭС выемочного участка угольной шахты, включающая в себя распределительную сеть и электропривода горных машин, позволяющая моделировать режимы работы СЭС в условиях динамического изменения электрических нагрузок с учётом особенностей технологического процесса, а также горно-геологических условий и технологических параметров ГШО, пригодная для моделирования графика изменения потребляемой реактивной мощности СЭС выемочного участка и выбора оптимальных параметров УКРВ.

3. Выполнена валидация разработанной имитационной модели электропривода резания очистного комбайна, на основании которой установлено,

что отклонения результатов моделирования от результатов натурных измерений не превышают 0,55 %.

4. Выполнен сравнительный анализ методов оптимизации для решения задачи выбора оптимальных параметров УКРВ с использованием вычислительноёмкой имитационной модели, на основании которого обосновано использование суррогатного алгоритма оптимизации при формировании начального набора оптимизируемых параметров с помощью предварительной оптимизации реактивной мощности генетическим алгоритмом по заданной гистограмме частот.

5. Предложены подходы к выбору мощности, числа ступеней, количества и мест размещения УКРВ на основе использования паспортных параметров электродвигателей ГШО, массива результатов измерений потребляемой реактивной мощности и методов имитационного моделирования и оптимизации. Апробация предложенных подходов выполнена на примере СЭС выемочного участка одной из угольных шахт Кемеровской области.

6. Установлено, что использование УКРВ в подземной части угольных шахт обладает высокой экономической эффективностью и может обеспечить чистый дисконтированный доход до 3,63...25,59 млн. руб в течение срока службы УКРВ при сроке окупаемости от 0 лет (на этапе проектирования СЭС УКРВ могут окупаться сразу, если сокращение капитальных затрат на электросетевое оборудование превысит капитальные затраты на УКРВ) до 10 лет (на этапе эксплуатации СЭС).

7. Определено, что использование суррогатного алгоритма для оптимизации параметров УКРВ в имитационной модели СЭС выемочного участка угольной шахты на 7...20 % более эффективно по сравнению с подходами, не предусматривающими использование имитационной модели.

Перспективные направления дальнейших исследований:

1. Учёт скорости подвигания забоя в алгоритме выбора оптимальных параметров УКРВ.

2. Модификация разработанных имитационных моделей с использованием методов машинного обучения для снижения требовательности к вычислительным ресурсам и обеспечения универсальности имитационных моделей электроприводов горных машин.

3. Модификация разработанной имитационной модели для её применения в условиях других предприятий минерально-сырьевого комплекса.

4. Расширение разработанной имитационной модели для прогнозирования профилей электрической нагрузки предприятий минерально-сырьевого комплекса.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях в изданиях Web of Science, Scopus, рекомендованных ВАК:

1. Воронин В. А. Имитационное моделирование электропривода очистного комбайна для оценки показателей энергоэффективности системы электроснабжения / В. А. Воронин, Ф. С. Непша // Journal of Mining Institute. – 2020. – Т. 246. – С. 633-639.
2. Воронин В.А. Анализ режимов работы электротехнического оборудования выемочного участка современной угольной шахты / В.А. Воронин, Ф.С. Непша, А.Н. Ермаков, Л.И. Кантович // Устойчивое развитие горных территорий, 2021. – №4. – С. 599–607 doi: 10.21177/1998-4502-2021-13-4-599-607

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:

3. Непша Ф.С. Методология имитационного компьютерного моделирования системы электроснабжения выемочного участка угольной шахты / Ф.С. Непша, В.А. Воронин, А.Н. Ермаков // Горное оборудование и электромеханика. - 2020. - №6. - С. 59-67
4. Воронин В.А. Оптимизация мощности и мест подключения УКРВ в условиях неравномерных электрических нагрузок выемочных участков угольных шахт / В.А. Воронин, Ф.С. Непша // Горное оборудование и электромеханика. - 2022. - №1. - С. 61-68

Публикации в изданиях Web of Science, Scopus:

5. Voronin V. A. The Novel Approach to Mechanically Switched Capacitors Sizing for a Longwall Shearer / V. A. Voronin, F. S. Nepsha, A. N. Ermakov // 2021 XV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems Of Electronic Instrument Engineering (APEIE) 2021 XV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems Of Electronic Instrument Engineering (APEIE). – 2021. – С. 171-174.
6. Voronin V. A. Modelling and Simulation of Scraper Face Conveyor Electric Drive / V. A. Voronin, F. S. Nepsha // 2020 Ural Smart Energy Conference (USEC) 2020 Ural Smart Energy Conference (USEC). – 2020. – С. 63-67.
7. Voronin V. Simulation and Analysis of Reactive Power Consumption of the Coal Mine Excavation Area / V. Voronin, F. Nepsha, A. Ermakov // 2021 Ural-Siberian Smart Energy Conference (USSEC) 2021 Ural-Siberian Smart Energy Conference (USSEC). – 2021. – С. 134-137.
8. Application of FACTS Devices in Power Supply Systems of Coal Mines / F. Nepsha, V. Voronin, R. Belyaevsky [et al.] // E3S Web of Conferences. – 2020. – Vol. 174. – P. 03026.
9. Simulation modeling of the power supply system of the coal mine excavation area with facts devices / V. Voronin, F. Nepsha, A. Kulikov [et al.] // E3S Web of Conferences. – 2021. – Vol. 315. – P. 01013.

10. Simulation of the power supply system of the coal mine section / F. Nepsha, V. Voronin, A. Khoreshok, A. Ermakov // E3S Web of Conferences. – 2021. – Vol. 315. – P. 03026.

11. Voronin V. Analysis of electric consumption: a study in the excavation area of the modern coal mine / V. Voronin, F. Nepsha, A. Ermakov // E3S Web of Conferences. – 2021. – Vol. 326. – Analysis of electric consumption. – P. 00005.

Прочие публикации по теме исследования:

12. В. А. Воронин. Перспективы использования D-STATCOM в угольных шахтах / В. А. Воронин, Ф. С. Непша // Перспективы инновационного развития угольных регионов России. Сборник трудов VII Международной научно-практической конференции, 30 апреля 2020 года – Прокопьевск : филиал КузГТУ в г. Прокопьевске, 2020.

13. В. А. Воронин. Применение управляемых конденсаторных установок в системах электроснабжения угольных шахт / В. А. Воронин, Ф. С. Непша // Россия молодая: Сборник материалов XIII Всерос. научно-практической конференции с международным участием, 20-24 апр. 2021 г., Кемерово [Электронный ресурс] / ФГБОУ ВО «Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева»; редкол.: К. С. Костиков (отв. ред.) [и др.]. – Кемерово : КузГТУ, 2021.

14. В. А. Воронин. Разработка имитационной модели системы электроснабжения выемочного участка угольной шахты / В. А. Воронин, Ф. С. Непша // Энергетика и энергосбережение: теория и практика. Сборник материалов V Всероссийской научно-практической конференции, 16 – 17 декабря 2020. [Электронный ресурс] / Под ред.: Р.В. Беляевский, И.А. Лобур. – Кемерово : КузГТУ, 2020.

15. Воронин В. А. Разработка алгоритма выбора оптимальной конфигурации ступенчатой конденсаторной установки / В. А. Воронин, Ф. С. Непша, С. А. Варнавский // ЭНЕРГОСТАРТ. Материалы IV Всероссийской молодежной научно-практической конференции. – Кемерово : КузГТУ, 2021.

16. Ф. С. Непша. К вопросу оптимального размещения взрывозащищенных устройств компенсации реактивной мощности на угольных шахтах / Ф. С. Непша, В. А. Воронин // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2020. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2020.

17. Ф. С. Непша. Формирование базы данных для электротехнического комплекса угольной шахты / Ф. С. Непша, В. А. Воронин // Энергетика и энергосбережение: теория и практика. Сборник материалов V Всероссийской научно-практической конференции, 16 – 17 декабря 2020. [Электронный ресурс] / Под ред.: Р.В. Беляевский, И.А. Лобур. – Кемерово : КузГТУ, 2020.

18. Воронин В.А. Оценка целесообразности использования УКРВ в подземной части угольных шахт / В.А. Воронин, Ф.С. Непша // Энергетика и энергосбережение: теория и практика. Сборник материалов VI Всероссийской научно-практической конференции, 8 – 10 декабря 2021. [Электронный ресурс] / Под ред.: Р.В. Беляевский, И.А. Лобур. – Кемерово: КузГТУ, 2022

Результаты интеллектуальной деятельности:

19. В. А. Воронин. Программа для ЭВМ № 2021669862 Программа для выбора оптимальной конфигурации многоступенчатой конденсаторной установки на очистных участках угольных шахт / В. А. Воронин, Ф. С. Непша. – КузГТУ, 2021.

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

[1, 4-6, 12-15, 18] – разработка основных теоретических положений, разработка имитационной модели, выполнение моделирования и анализа полученных результатов, формулирование выводов, написание основного объёма статьи;

[2, 7, 11] – обработка, описание и визуализация данных, формулирование выводов, написание основного объёма статьи;

[3, 10] – описание разработанной имитационной модели;

[8] – выполнение обзора литературных источников, написание двух разделов статьи;

[9] – координация работы соавторов, анализ и описание полученных результатов, перевод статьи;

[16] – написание основного объёма статьи по предоставленным расчётным результатам;

[17] – общая редакция статьи;

[19] – разработка, написание и тестирование кода программы, подготовка сопроводительных документов для заявки.

Подписано к печати __. __ 2022г.

Усл. печ. л. 1,00. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Тираж ____ экз. Заказ № ____.

КузГТУ. 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28.

Отпечатано в издательском центре УИП КузГТУ.

650000, г. Кемерово, ул. Д. Бедного, 4А