

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

РЕШЕТНЯК Сергей Николаевич

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЛИЯНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА
ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ УГОЛЬНЫХ ШАХТ**

Специальность 2.4.2 – «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант – профессор, докт. техн. наук Ляхомский А.В.

Москва 2025 год

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Развитие добычи угля подземным способом вызвало необходимость внедрения новых технологических схем, современных технических средств с увеличением мощности выемочного, подготовительного и транспортного оборудования.

Технологическое оборудование является основным потребителем электроэнергии, на долю которого приходится 70 – 80% электропотребления угольных шахт. Мощность выемочных комплексов доходит до 5500 кВт, проходческих комплексов до 800 кВт. Доля электрооборудования с регулирующими системами электроприводов составляет 35%, нерегулируемых - 65%. При этом имеет место положительный тренд увеличения мощности преобразовательных устройств систем управления электроприводами.

Расширяющиеся применение и увеличение мощности преобразовательных устройств обуславливает рост уровня высших гармонических составляющих (ВГС) и снижения качества электроэнергии, что негативно влияет на эффективность функционирования электротехнических систем (ЭТС) угольных шахт. Это приводит к ложным срабатываниям защит от аварийных режимов; простоям технологического оборудования и снижению его производительности; сокращению срока службы электрооборудования, кабельных линий за счет интенсивного старения изоляции и, как следствие, повышению вероятности аварий, что особенно недопустимо, в угольных шахтах, опасных по внезапным выбросам газа и пыли.

При широком внедрении преобразовательной техники повышение эффективности функционирования ЭТС угольных шахт ограничивается ростом негативного влияния ВГС на качество электроэнергии и недостаточным научно-методическим обеспечением управления их уровнем.

В связи с этим целесообразно выполнить исследования режимов генерирования ВГС с установлением зависимостей показателей качества электроэнергии (ПКЭ) от параметров ЭТС, мощности преобразовательных устройств систем электропривода, показателей режимов электропотребления.

В связи с вышеизложенным установление закономерностей влияния качества электроэнергии на эффективность функционирования ЭТС угольных шахт с научным обоснованием и разработкой технических решений и рекомендаций по управлению уровнем ВГС является актуальной научно-технической проблемой.

Степень разработанности проблемы.

Проработка вопросов, связанных с обеспечением качества электроэнергии основана на исследованиях отечественных и зарубежных ученых: Абрамовича Б.Н., Бабокина Г.И., Боярской Н.П., Гамазина С.И., Герман-Галкина С.Г., Дмитриева Б.Ф., Довгун В.П., Ершова М.С., Ефимова А.А., Жежеленко И.В., Железко Ю.С., Зацепиной В.И., Ляхомского А.В., Немцева Г.А., Пивняка Г.Г., Плащанского Л.А., Пронина М.В., Розанова Ю.К., Сычева Ю.А., Чивенкова А.И., Шевырёва Ю.В., Шидловского А.К., Шпигановича А.Н., Шрейнера Р.Т., Янченко С.А., *Litran S.P., Salmeron P., Prieto J., Alejandro Perez, Ning Wang, Zongguo Wena, Mingqi Liu, Jie Guo* и др.

По проблеме влияния ВГС на эффективность функционирования ЭТС промышленных предприятий выполнено значительное число исследований. Вместе с этим исследований режимов генерирования и снижения негативного влияния ВГС на эффективность функционирования ЭТС угольных шахт проведено недостаточно. При всей общности процессов технического характера системы электроснабжения (СЭС) угольных шахт обладают специфическими свойствами, связанными с высокой пространственно-временной динамичностью, близостью электрооборудования к технологическим зонам, значительной интенсивностью использования оборудования, специфическим воздействием внешней окружающей среды.

Цель работы. Установление закономерностей влияния показателей качества электроэнергии для научно-технического обоснования решений, направленных на повышение эффективности функционирования ЭТС угольных шахт.

Идея работы заключается в том, что повышение эффективности функционирования ЭТС угольных шахт возможно путем установления закономерностей режимов генерирования ВГС для управления уровнем ПКЭ с целью достижения требуемых значений.

Задачи научных исследований.

1. Проведение экспериментальных исследований ПКЭ в условиях ЭТС угольных шахт.
2. Разработка имитационных моделей и моделирование режимов генерирования ВГС преобразовательными устройствами систем электроприводов ЭТС поверхностного и подземного комплексов угольных шахт.
3. Установление зависимостей суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения от соотношения нелинейной и линейной нагрузки электрооборудования выемочных и проходческих участков угольных шахт.
4. Обоснование применения фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ) для обеспечения требуемых значений ПКЭ в подземных участковых сетях угольных шахт.
5. Установление закономерностей, влияющих на эффективность функционирования ЭТС угольных шахт.
6. Реализация научно-технических решений для обеспечения повышения эффективности функционирования ЭТС угольных шахт.

Область исследования соответствует п. 1 «Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем», п. 3 «Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления», п. 4 «Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях» паспорта научной специальности 2.4.2 – «Электротехнические комплексы и системы».

Объект исследования. ЭТС угольных шахт с источниками генерирования ВГС.

Предмет исследования. Режимы генерирования ВГС в ЭТС угольных шахтах.

Методология и методы исследований. Для решения поставленных в диссертационной работе задач использованы методы: измерения электрических величин; теории электроснабжения промышленных предприятий; вероятностно-статистической обработки результатов экспериментальных исследований и имитационного моделирования режимов генерирования ВГС; корреляционно-регрессионного анализа; преобразований Кларк. Для подтверждения теоретических выводов использовались результаты проведенных экспериментальных исследований в ЭТС угольных шахт.

Научная новизна работы.

- Разработаны имитационные модели для исследования режимов генерирования ВГС преобразовательными устройствами систем электропривода добычного и проходческого оборудования, позволяющие выполнять оценку ПКЭ в участковых подземных электрических сетях угольных шахт.
- Установлены зависимости генерирования ВГС системами электропривода выемочных и проходческих комбайнов, забойных конвейеров и перегружателей, позволяющие выполнять оценку суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения с учетом уровней нелинейной и линейной электрической нагрузки.
- Выявлены зависимости влияния мощностей нелинейной нагрузки и пассивного фильтра комбинированных ФКУ на суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения в подземных участковых электрических сетях угольных шахт.
- Определены зависимости, позволяющие выполнять оценку суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения при изменении параметров

электрических сетей и мощности электропотребителей с нелинейной нагрузкой ЭТС угольных шахт.

Основные научные положения, выносимые на защиту, и их новизна

- Имитационные модели для исследования режимов генерирования ВГС в ЭТС угольных шахт, отличающиеся тем, что позволяют осуществлять оценку и управление ПКЭ с обеспечением требуемых уровней.
- Зависимости суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения от мощностей нелинейной нагрузки и комбинированного ФКУ, отличающиеся тем, что позволяют оценивать параметры режимов генерирования ВГС в подземных участковых ЭТС угольных шахт.
- Зависимости суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения от мощности преобразовательных устройств систем электропривода технологического оборудования поверхностного комплекса, отличающиеся учетом топологии электрических сетей угольных шахт.
- Эмпирические зависимости суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения от мощностей нелинейной нагрузки и пассивного фильтра высших гармоник, отличающиеся тем, что позволяют оценивать параметры режимов генерирования ВГС в ЭТС поверхностного комплекса угольных шахт.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается: корректным использованием общепризнанных теорий и методов; достаточной сходимостью результатов экспериментальных исследований и имитационного моделирования на уровне не менее 0,9; принятыми к внедрению основных результатов диссертации на предприятиях и в организациях угольной отрасли.

Теоретическая значимость. В установлении зависимости влияния параметров комбинированного ФКУ на уровень генерирования ВГС в участковых электрических сетях угольных шахт с учетом мощностей нелинейной нагрузки и пассивного фильтра комбинированного ФКУ. В установлении зависимостей суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения с учетом мощностей нелинейной нагрузки и ФКУ в ЭТС поверхностного комплекса угольной шахты различной топологии. В установлении зависимостей суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения и отклонения напряжения при фиксированных относительных значениях мощности нелинейной нагрузки. В разработке имитационных моделей режимов генерирования ВГС в ЭТС угольных шахт для оценки и управления уровнем ВГС при негативном влиянии электропотребителей с нелинейной нагрузкой на ПКЭ.

Практическая значимость и реализация результатов исследования.

Результаты работы приняты к использованию в ИПКОН РАН, АО «Русский уголь», Угольном департаменте АО «Арселормиттал Темиртау» (шахта им. Костенко, шахта Саранская), Угольном департаменте АО «*QARMET*» (шахта им. Кузембаева), в виде:

- методики имитационного моделирования СЭС высокопроизводительных участков угольных шахт для исследования ПКЭ;
- методики имитационного моделирования СЭС угольных шахт высокой производительности;
- рекомендаций по обеспечению качества электроэнергии для повышения эффективности функционирования ЭТС угольных шахт.

Результаты исследований внедрены в учебный процесс по направлению: 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» по дисциплинам «Электроснабжение», «Промышленная электроника»; 21.05.04 направление «Горное дело» по дисциплинам: «Электроснабжение горных предприятий», «Промышленная электроника».

Апробация результатов работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на научно-практических конференциях и симпозиумах: «Неделя горняка – 2005 - 2025» (Москва, 2005 - 2025); научные семинары кафедры «Энергетика и энергоэффективность горной промышленности»; Международная научная школа молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке – глазами молодых» (Москва,

2014, 2015, 2016, 2019); 2-ая Международная конференция с элементами научной школы «Актуальные проблемы энергосбережения и энергоэффективности в технических системах», (Тамбов, 2014); 2-я научно-техническая конференция молодых ученых «Электротехнические комплексы и системы в нефтяной и газовой промышленности» (Москва, 2014); Всероссийская научно-практическая конференция: Автоматизированный электропривод и автоматика (Липецк, 2014); Международная научно-практическая интернет-конференция «Энерго- и ресурсосбережение - XXI ВЕК » (Орел, 2014, 2016); Международная научно-техническая конференция «Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий» (Уфа, 2015, 2017, 2019); Международная научно-практическая конференция «Подземная угледобыча 21 век» (Ленинск-Кузнецкий, 2018); Международная научная школа академика К.Н. Трубецкого "Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр» (Москва, 2018, 2020); III Международный конгресс «Энергетическая безопасность» (Курск, 2020); *VI-th International Innovative Mining Symposium* (Кемерово, 2021); расширенный научный семинар ИПКОН РАН (Москва, 2024); Международная научно-техническая конференция «Технологический суверенитет и цифровая трансформация» (Казань, 2024).

Публикации и патент. По теме диссертации опубликовано 50 работ, из которых 15 в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 10 в журналах, реферируемых в базах *Scopus*, *GeoRef*, 1 патент на полезную модель.

Личный вклад автора. Разработка методик исследования режимов генерирования ВГС тока и напряжения преобразовательными устройствами систем электропривода технологического оборудования угольных шахт. Разработка имитационных моделей режимов генерирования ВГС в ЭТС угольных шахт. Установление зависимостей, позволяющих оценивать суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения с учетом мощностей нелинейной нагрузки и комбинированного ФКУ в подземных участковых ЭТС угольных шахт, обеспечивающих требуемый уровень ПКЭ. Установление зависимостей суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения от топологии электрических сетей и мощности нелинейной нагрузки в условиях ЭТС угольных шахт. Разработка рекомендаций по обеспечению ПКЭ для повышения эффективности функционирования ЭТС. Концептуальные принципы по разработке устройства мониторинга ПКЭ и компенсации влияния ВГС в подземных участковых электрических сетях.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, содержит 126 рисунка, 39 таблиц, список литературы из 277 наименований и 8 приложений. Общий объем диссертации - 311 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика диссертационной работы, обоснована ее актуальность, сформулированы цель исследования, идея, научная новизна, научные положения, теоретическая и практическая значимость.

В первой главе выполнен анализ исследований по эффективности функционирования ЭТС угольных шахт и обоснована актуальность научно-технической проблемы повышения качества электроэнергии.

Выполнен анализ основных направлений исследований по повышению эффективности функционирования ЭТС промышленных предприятий, в том числе угольных шахт, касающихся управления уровнем ВГС для обеспечения нормативных ПКЭ, развития аналитического описания режимов генерирования ВГС, включающего установление зависимостей суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения и тока от электротехнических показателей электроприемников, повышения ПКЭ путем структурного и параметрического синтеза ЭТС с ФКУ.

В исследованиях показателей качества электроэнергии в условиях угольных шахт практически не рассматривались вопросы, касающиеся:

- установления зависимостей генерирования ВГС от соотношения нелинейной и линейной электрических нагрузок подземных технологических электроприемников;
- распространения ВГС, генерируемых электроприемниками поверхностного комплекса угольных шахт, в подземные электрические сети;
- имитационного моделирования режимов генерирования ВГС с охватом диапазонов изменения электротехнических показателей при работе технологических электроприемников;
- обоснования параметров и применения ФКУ в подземных участковых ЭТС;
- разработки научно-методического и научно-технического обеспечения управления уровнем ВГС;
- установления закономерностей влияния ПКЭ на эффективность функционирования ЭТС угольных шахт.

Выполнена классификация электропотребителей угольных шахт по виду – линейной, нелинейной - электрической нагрузки, в результате которой установлены источники генерирования ВГС как в подземном, так и в поверхностном комплексах. Основными источниками генерирования ВГС в поверхностном комплексе являются шахтные подъемные установки (ШПУ), доля которых в балансе мощности шахты составляет 20 %, а в балансе мощности поверхностного комплекса – 40 %.

Основными источниками генерирования ВГС в подземном комплексе являются выемочные и проходческие комбайны, забойные конвейера и перегружатели, доля которых в балансе мощности шахты составляет соответственно 7,4 и 1,2 %, а в балансе мощности подземного комплекса – 15,6 %.

Выполнен схемный анализ технических средств повышения ПКЭ: пассивных, активных и комбинированных ФКУ. Установлено, что в специфических условиях подземных горных работ ФКУ практически не используются, что подчеркивает актуальность научной проблемы по научному обоснованию и разработке технических решений их применения, рекомендаций по управлению уровнем ВГС в подземных электрических сетях.

Обоснованы цель и сформулированы задачи диссертационного исследования.

Во второй главе выполнено экспериментальное исследование ПКЭ в системах электроснабжения угольных шахт в условиях поверхностного и подземного комплексов.

Выполнен декомпозиционный анализ схем электроснабжения для исследования влияния нелинейной нагрузки на ПКЭ в условиях ЭТС угольных шахт. Для ЭТС угольной шахты характерны три уровня декомпозиции: первый уровень – система внешнего

электропитания, включающая коммутационные аппараты и первичные обмотки силовых трансформаторов ГПП напряжением 35 (110) кВ; второй уровень – вторичные обмотки силовых трансформаторов ГПП, кабельные линии, питающие электропотребителей поверхностного комплекса, кабельные линии, питающие подземные высоковольтные электропотребители, первичные обмотки трансформаторных подстанций энергопоездов подземных участков, высоковольтные электропотребители с линейной и нелинейной нагрузкой поверхностного и подземного комплекса; третий уровень – вторичные обмотки трансформаторных подстанции энергопоездов подземных участков, кабельные линии, питающие подземные электропотребители с линейной и нелинейной нагрузкой, подземные участковые электропотребители с линейной и нелинейной нагрузкой.

Разработана методика экспериментального исследования режимов генерирования высших гармонических составляющих с учетом декомпозиции ЭТС, блок-схема которой приведена на рис. 1.

Методика экспериментального исследования исследований ПКЭ с учетом декомпозиции ЭТС включает:

Этап 1 (п.1 – 9).

Анализ наличия ФКУ в ЭТС; измерение ПКЭ на шинах ГПП; проверку ПКЭ на соответствие ГОСТ 32144–2013 при наличии или отсутствии ФКУ в ЭТС; определение ПКЭ, несоответствующих ГОСТ 32144–2013; определение отклонения ПКЭ; установление возможности корректировки ФКУ; разработку и реализацию рекомендаций по корректировке параметров ФКУ; повторное измерение ПКЭ при скорректированных параметрах ФКУ; проверку ПКЭ на соответствие ГОСТ32144–2013; при соответствии ПКЭ ГОСТ 32144–2013 - завершение исследования; при не соответствии ПКЭ требуемым значениям - переход на этап 2;

Этап 2 (п.10 – 23).

Определение источников ВГС поверхностного и подземного комплексов; измерение ПКЭ источников ВГС; проверку ПКЭ на соответствие ГОСТ 32144–2013; при соответствии ПКЭ ГОСТ32144–2013 - завершение исследования в поверхностном или подземном комплексе; при не соответствии ПКЭ ГОСТ 32144–2013 определение уровня их отклонения; разработка рекомендаций по повышению ПКЭ; реализация рекомендаций по повышению ПКЭ; проверку ПКЭ на соответствие ГОСТ 32144–2013; при соответствии ПКЭ ГОСТ 32144–2013 - завершение исследования; при не соответствии ПКЭ требуемым значениям ГОСТ 32144–2013 - переход в начало этапа 2.

Методика позволяет проводить экспериментальные исследования ПКЭ с оценкой их соответствия или несоответствия требованиям ГОСТ 32144–2013.

Экспериментальное исследование ПКЭ проводилось в соответствии с разработанной «Методикой экспериментального исследования ПКЭ в системах электропитания угольных шахт». Вместе с этим экспериментальное исследование выполнено в соответствии с требованиями Межгосударственного стандарта ГОСТ 30804.4.30–2013 (*IEC 61000-4-30:2008*) «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии» и РД 153–34.0-15.501-00 «Методические указания по контролю и анализу качества электрической энергии в системах электропитания общего назначения».

Экспериментальные исследования ПКЭ в электрических сетях поверхностного комплекса проведены на угольных шахтах: им. С.М. Кирова, Полысаевская, им. А.Д. Рубана, ш. Комсомолец, им. В.Д. Ялевского, «Заречная». Для измерения ПКЭ в электрических сетях поверхностного комплекса угольных шахт применялись анализаторы «Ресурс-UF2M», *Fluke* 435. При исследовании проведен анализ ПКЭ: отклонения частоты (Δf), Гц; отрицательного отклонения напряжения ($\delta U_{(-)}$); положительного отклонения напряжения ($\delta U_{(+)}$); коэффициента n -ой гармонической составляющей напряжения ($K_{U(n)}$); суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) или *Total Harmonic Distortion Voltage (THD(U))*;

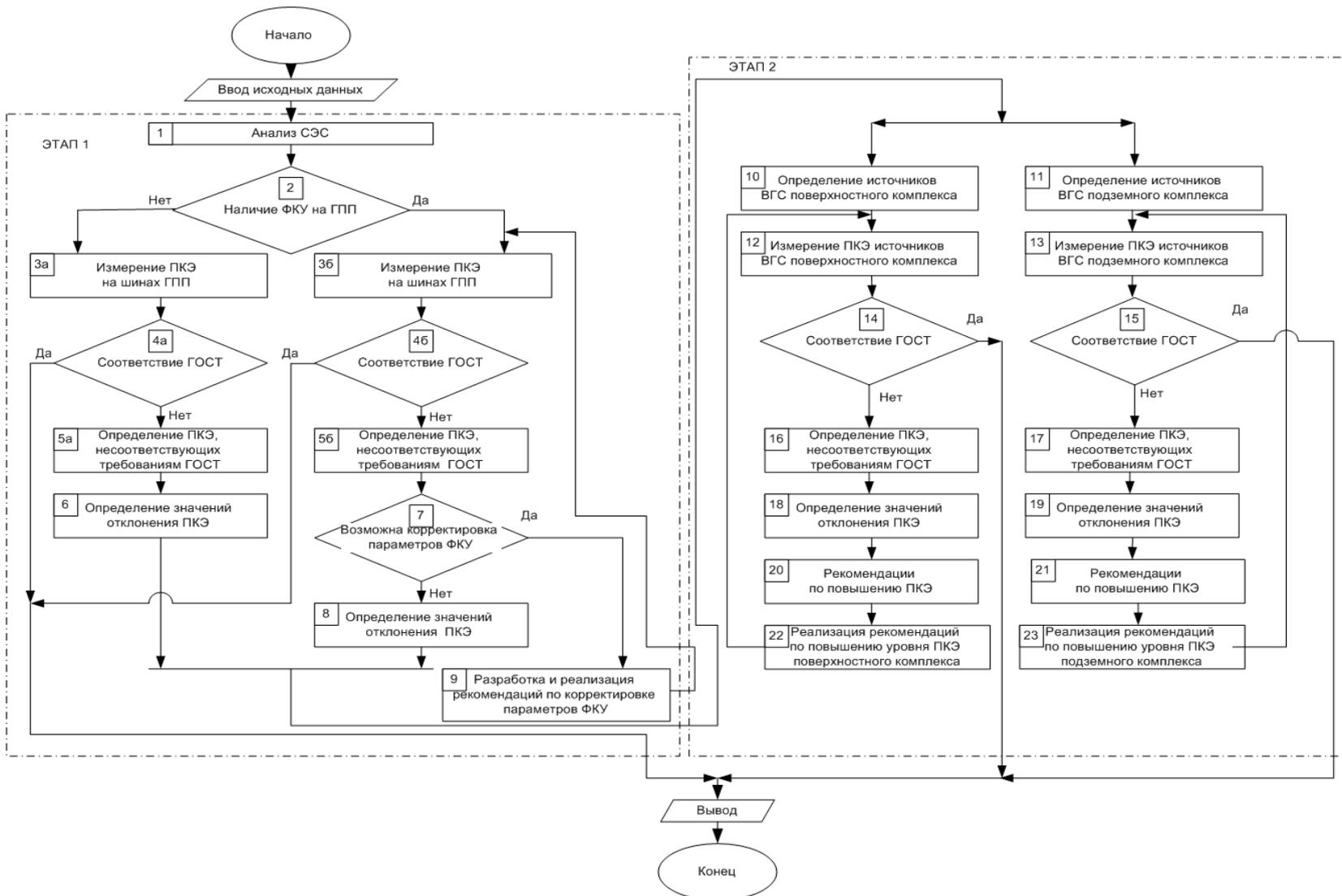


Рисунок 1 – Блок-схема методики экспериментального исследования ПКЭ, в системах электроснабжения угольных шахт, с учетом декомпозиции

коэффициента несимметрии напряжения обратной последовательности (K_{2U}); коэффициента несимметрии напряжения нулевой последовательности (K_{0U}).

Экспериментальное исследование ПКЭ в подземных участковых электрических сетях ЭТС проведено на угольных шахтах: им. С.М. Кирова, Полысаевская. Для измерения ПКЭ в подземных электрических сетях применялся анализатор ПКЭ *Algodue Elettronica UPM 3080*, встроенный в комплектное распределительное устройство взрывобезопасное – 6 кВ (КРУВ-6). При исследовании проведен анализ ПКЭ: отклонения частоты (Δf), Гц; отклонения напряжения (δU); коэффициента n -ой гармонической составляющей напряжения ($K_{U(n)}$); суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U).

ПКЭ в электрических сетях поверхностного комплекса угольных шахт приведены в табл. 1. ПКЭ и величина коэффициента мощности ($\cos\varphi$) в электрических сетях выемочных участков угольных шахт приведены в табл. 2.

Таблица 1 – ПКЭ в электрических сетях поверхностного комплекса угольных шахт

| Показатели | Требуемое значение ГОСТ 32144-2013 для напряжения 6 кВ | Диапазон изменения | Вывод |
|-----------------|--|--------------------|---|
| K_U , % | 5 | 4,3 – 13,5 | Превышение требуемого значения на всех шахтах, кроме ПС-62 «ш. им. С.М. Кирова» |
| Δf , Гц | $\pm 0,2$ | $\pm 0,05$ | В пределах требуемого значения |
| K_{0U} , % | 4 | 0,2 – 1,5 | В пределах требуемого значения |
| K_{2U} , % | 4 | 0,2 – 1,5 | В пределах требуемого значения |
| δU , % | ± 10 | 4,0 – 12,3 | Превышение требуемого значения на ПС-39 «ш. им. А.Д. Рубана» |

Таблица 2 – ПКЭ и коэффициент мощности ($\cos\varphi$) в электрических сетях выемочных участков угольных шахт

| Показатели, $\cos\varphi$ | Требуемое значение ГОСТ 32144-2013 для напряжения 6 кВ | Выемочный участок шахты «Полысаевская» | Выемочный участок шахты «им. С.М. Кирова» | Вывод |
|---------------------------|--|--|---|--------------------------------|
| K_U , % | 5 | 10,72 | 11,31 | Превышение требуемого значения |
| δU , % | ± 10 | 4,41 | 3,72 | В пределах требуемого значения |
| Δf , Гц | $\pm 0,2$ | $\pm 0,05$ | $\pm 0,05$ | В пределах требуемого значения |
| $\cos\varphi$ | - | 0,76 | 0,78 | Невысокое значение |

Выводы по главе 2.

1. Для исследования режимов генерирования ВГС в ЭТС угольных шахт разработана методика экспериментального исследования ПКЭ в системах электроснабжения угольных шахт.

2. Результаты экспериментального исследования ПКЭ в электрических сетях 6 кВ поверхностного комплекса угольных шахт показывают:

2.1 отклонения частоты (Δf) находятся в диапазоне $\pm 0,05$ Гц и удовлетворяют требованию ГОСТ, равному $\pm 0,2\%$, коэффициенты напряжения обратной (K_{2U}), и нулевой последовательности (K_{0U}) находятся в диапазоне 0,2 - 1,5 % и удовлетворяют требованию ГОСТ 32144-2013, равному 4 %.

2.2 значения суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) находятся в диапазоне 4,3 – 13,5 % и не удовлетворяют требованию ГОСТ 32144-2013 которое равно 5 %, за исключением ПС-62;

2.3 значения отклонения напряжения (δU) в электрических сетях 6 кВ обследованных шахт находятся в диапазоне 4,0-9,3 %, и удовлетворяют требованию ГОСТ 32144-2013, равному ± 10 %, за исключением ПС-39.

3. Результаты экспериментального исследования ПКЭ в подземных электрических сетях 6 кВ выемочных участков угольных шахт показывают:

3.1 значения отклонения частоты (Δf) находятся в диапазоне $\pm 0,05$ Гц и удовлетворяют требованию ГОСТ 32144-2013, равному $\pm 0,2\%$.

3.2 значения отклонения напряжения (δU) в подземных электрических сетях находятся в диапазоне 3,72 – 4,41 %, что удовлетворяет требованию ГОСТ 32144-2013, равному ± 10 %.

3.3 значения суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) в подземных электрических сетях шахт им. С.М. Кирова и Полысаевская находятся в диапазоне 10,72 – 11,31 %, что превышает требования ГОСТ 32144-2013, равное 5 %;

3.4 значения коэффициента мощности ($\cos\phi$) находятся в диапазоне 0,76 – 0,78, что является невысокими значениями согласно приказу Министерства энергетики РФ от 23 июня 2015 г. N 380 «О Порядке расчета значений соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств) потребителей электрической энергии».

4. Результаты экспериментального исследования ПКЭ показывают, что в ЭТС угольных шахт значения суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения (K_U), превышают требуемое ГОСТ 32144-2013 для электрических сетей 6 кВ в 1,86 – 2,7 раза.

5. Результаты экспериментального исследования подтверждают актуальность исследования режимов генерирования ВГС для обеспечения требуемых ГОСТ 32144-2013 значений ПКЭ.

В третьей главе проведено исследование режимов генерирования ВГС преобразовательными устройствами систем управления электроприводами технологического оборудования угольных шахт.

В результате установлено:

- основными источниками генерирования ВГС в электрических сетях поверхностного комплекса угольных шахт являются ШПУ, нелинейная электрическая нагрузка которых, формируемая преобразовательными устройствами систем управления электроприводами, составляет 44 % нагрузки поверхностного комплекса;
- основными источниками генерирования ВГС в подземных участковых электрических сетях являются выемочные комбайны, забойные конвейеры, перегружатели, нелинейная электрическая нагрузка которых, формируемая преобразовательными устройствами систем управления электроприводами, составляет 13,5 % нагрузки подземного комплекса угольных шахт.

Разработана методика имитационного моделирования режимов генерирования ВГС в ЭТС угольных шахт, блок-схема которой приведена рис. 2.

Методика имитационного моделирования режимов генерирования ВГС в ЭТС угольных шахт (п.1 – 9) включает: анализ схемы электроснабжения угольной шахты, измерение ПКЭ; определение конфигурации и электротехнических параметров систем управления электроприводами основного технологического оборудования; установление основных источников ВГС в ЭТС поверхностного и подземного комплексов; разработку имитационной модели ЭТС угольной шахты для исследования ПКЭ; моделирование режимов генерирования ВГС в ЭТС угольной шахты; оценку сходимости результатов моделирования с результатами экспериментального исследования; при необходимости

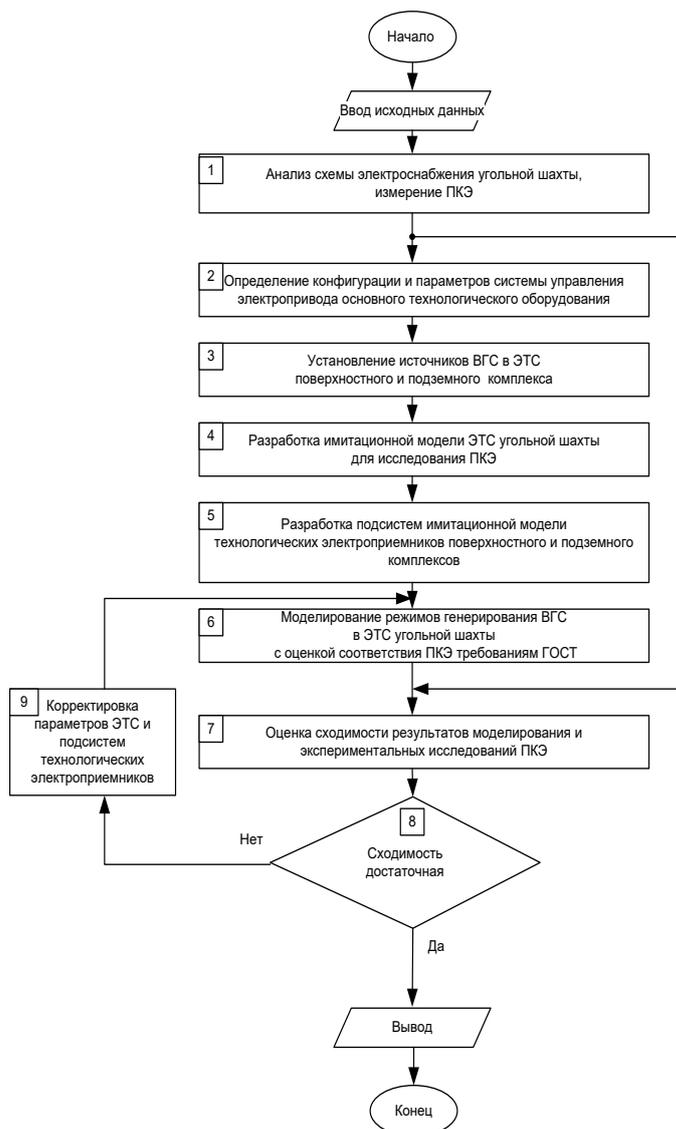


Рисунок 2 – Блок-схема методики имитационного моделирования режимов генерирования ВГС в ЭТС угольных шахт

корректировку параметров ЭТС и технологических электроприемников имитационной модели.

Методика позволяет исследовать режимы генерирования высших гармонических составляющих для установления зависимостей показателей качества электроэнергии от параметров электротехнической системы, мощности преобразовательных устройств систем электропривода, показателей режимов электропотребления.

Для исследования режимов генерирования ВГС разработаны модели: 6-ти пульсной ЭМС «Управляемый выпрямитель – двигатель постоянного тока» (УВ-ДПТ) (рис. 3а); 6-ти пульсной ЭМС УВ-ДПТ с 7-периодной тахограммой движения подъемных сосудов (рис. 4а); 6-ти пульсной ЭТС «Преобразователь частоты – асинхронный двигатель» (ПЧ – АД) (рис. 5а); 6-ти пульсной ЭТС (рис. 6а).

Осциллограммы момента (M), скорости двигателя (V) на валу электродвигателя и суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения 6-ти пульсной ЭМС УВ-ДПТ приведены на рис. 3б.

Осциллограммы момента (M), скорости двигателя (V) на валу электродвигателя и суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения 6-ти пульсной ЭМС УВ-ДПТ с 7-периодной тахограммой движения подъемных сосудов приведены на рис. 4б.

Осциллограммы суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения 6-ти пульсной ЭМС ПЧ-АД приведены на рис. 5б.

Осциллограммы суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения 6-ти пульсной ЭТС приведены на рис. 6б.

Получены эмпирические зависимости пиковых и установившихся значений суммарного коэффициента высших гармонических составляющих напряжения K_U от угла управления выпрямителем α (рис. 7) в виде выражений:

- для пикового значения $K_U = 7,899 + 0,278 * \alpha - 0,002 * \alpha^2$, (1);
- для установившегося значения $K_U = 4,514 + 0,231 * \alpha - 0,002 * \alpha$ (2).

Полученные зависимости характеризуются очень высокой точностью средней ошибки аппроксимации по шкале Чеддока, находящейся в диапазоне ($0\% < \bar{A} < 10\%$).

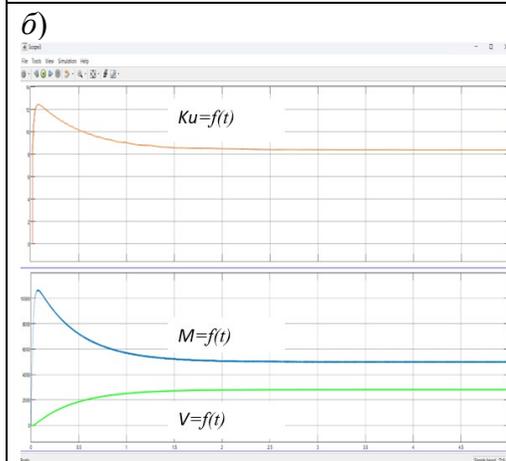
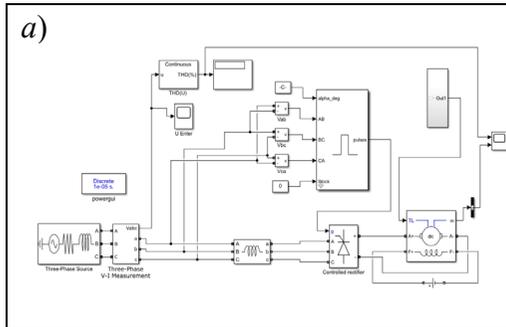


Рисунок 3 – Модель 6-ти пульсной ЭМС УВ-ДПТ для исследования режимов генерирования ВГС (а), динамика K_U , M , V (б)

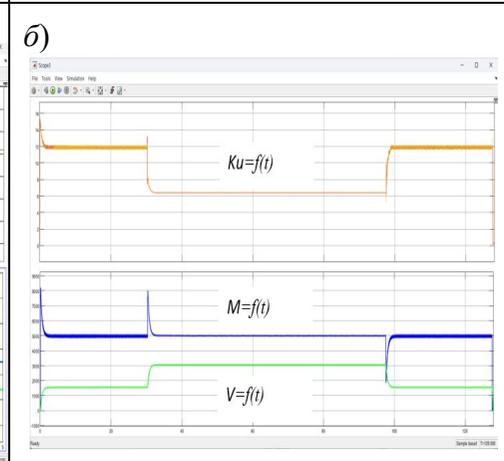
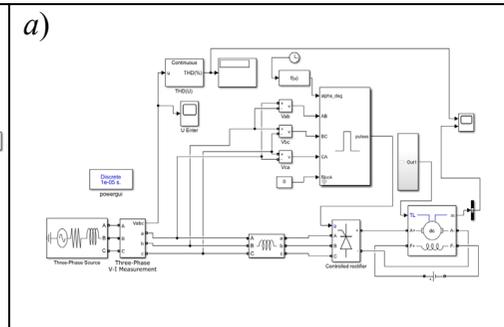


Рисунок 4 – Модель 6-ти пульсной ЭМС УВ-ДПТ для исследования режимов генерирования ВГС (7-периодная тахограмма движения подъемных сосудов ШПУ) (а), динамика K_U , M , V (б)

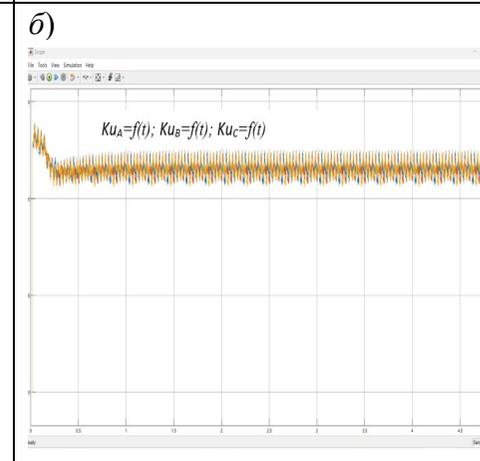
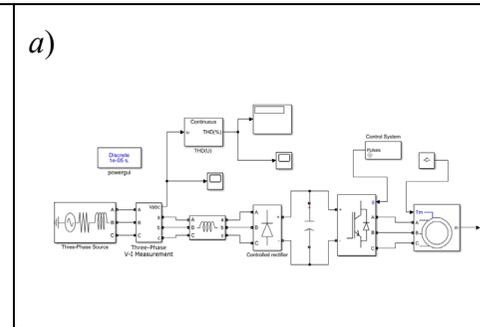


Рисунок 5 – Модель 6-ти пульсной ЭМС ПЧ – АД для исследования режимов генерирования ВГС (а), динамика K_U (б)

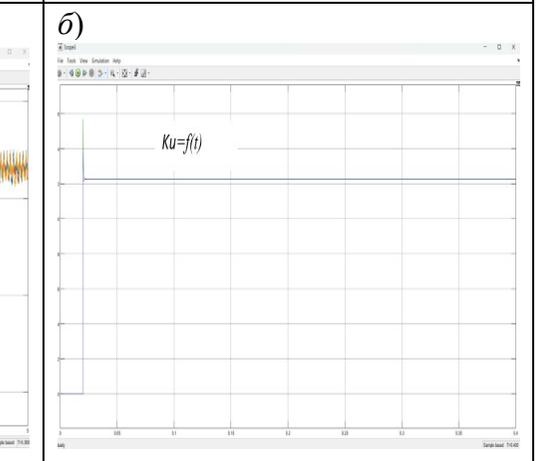
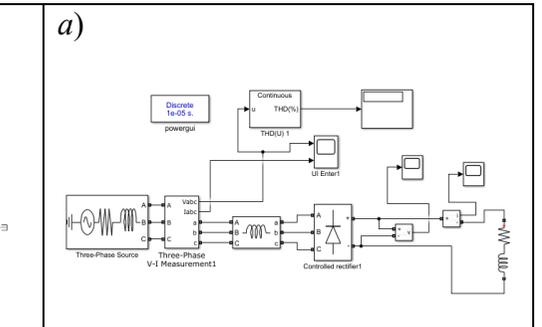


Рисунок 6 – Модель 6-ти пульсной ЭТС для исследования режимов генерирования ВГС в подземных электрических сетях (а), динамика K_U (б)

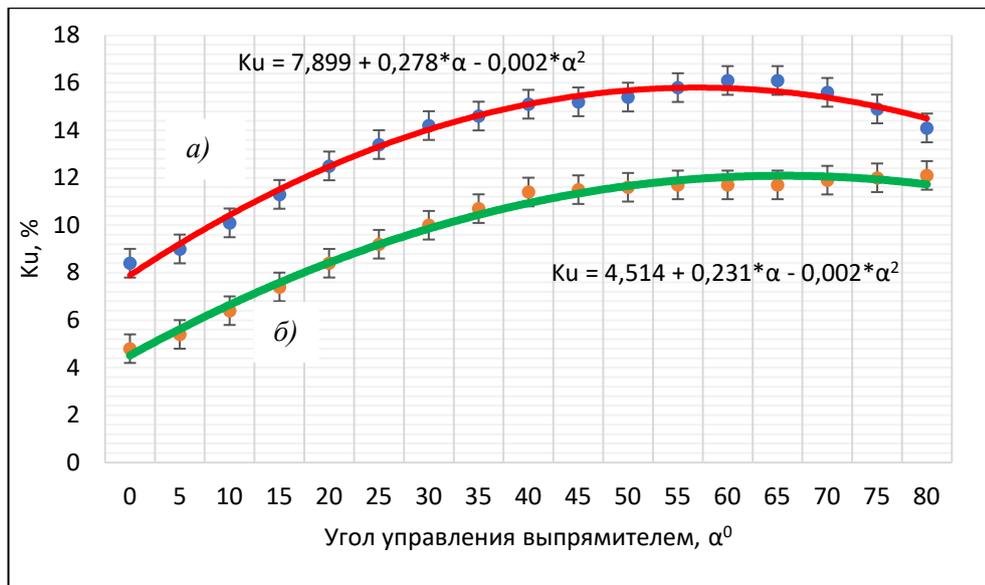


Рисунок 7 – Зависимости суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) в 6-ти пульсной схеме ЭМС УВ-ДПТ от угла управления выпрямителем α : пиковое значение (а); установившееся значение (б)

Выводы по главе 3.

1. Выявлены технологические электропотребители как источники высших гармонических составляющих поверхностного и подземного комплексов угольных шахт.
2. Разработана методика имитационного моделирования режимов генерирования ВГС в ЭТС угольных шахт.
3. Разработаны имитационные модели и получены осциллограммы момента (M), скорости двигателя (V) на валу электродвигателя и суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) ЭМС УВ-ДПТ ШПУ (в том числе с семипериодной тахограммой движения подъёмных сосудов) и ЭМС ПЧ-АД для исследования режимов генерирования ВГС преобразовательными устройствами систем управления электроприводами.
4. Определены эмпирические зависимости пикового и установившегося значения суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) от угла управления выпрямителем α для 6-ти пульсной ЭМС УВ-ДПТ
5. Установлена допустимость использования имитационной модели 6-ти пульсной ЭТС (рис. 8) для исследования режимов генерирования преобразовательными устройствами схем управления электроприводами ПЧ-АД подземного технологического оборудования, так как значение K_U в ЭМС (рис. 7), равное 11,22%, практически совпадает с K_U в ЭТС (рис. 8), равного 12,27 %.
6. Установлено, что нет необходимости исследовать генерирование ВГС в ЭТС с 12-ти пульсной схемой выпрямления системы управления электроприводом, так как значение K_U равно 2,49 % при требуемом значении ГОСТ 32144-2013 - 5 %.

В четвертой главе выполнено исследование режимов генерирования ВГС в подземных участковых ЭТС угольных шахт с обоснованием параметров ФКУ.

На основании анализа технологических схем выемочных участков угольных шахт различной топологии при сосредоточенным или распределенным энергопоезде - разработаны структуры ЭТС выемочных участков для исследования режимов генерирования ВГС.

Для исследования режимов генерирования ВГС принята ЭТС выемочного участка с применением сосредоточенного энергопоезда (рис. 8).

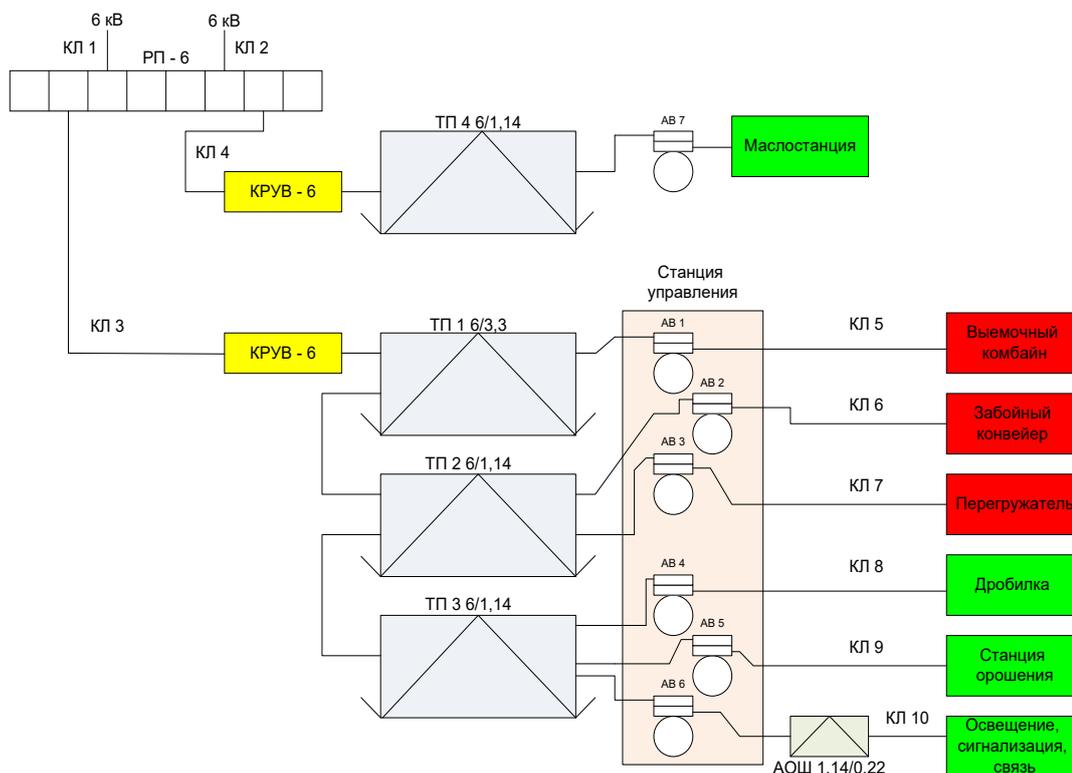


Рисунок 8 – Структурная схема ЭТС выемочного участка с сосредоточенным энергопоездом

Электрэнергия напряжением 6 кВ подводится от ЦПП по кабельным линиям до вводной ячейки КРУВ-6 энергопоезда, состоящего из трех понизительных подстанций 6/3,3 кВ, двух 6/1,14 кВ, служащих для электропитания выемочных комбайнов, забойных конвейеров, дробилок, перегружателей и станций орошения. В схему ЭТС входит станция управления технологическим оборудованием и аппарат осветительный шахтный (АОШ 1,14/0,22), для электроснабжения осветительных сетей, систем сигнализации и защиты, а также систем телеметрии и связи.

На основании анализа технологических схем 47-ми проходческих участков угольных шахт проведено их распределение по вариантам ведения подготовительных работ с определением наиболее распространённой технологической схемы: проходческий комбайн - ленточный перегружатель – ленточный конвейер – скребковый конвейер - ленточный конвейер. Структурная схема ЭТС проходческого участка приведена на рис. 9.

Исследование режимов генерирования ВГС в электрических сетях выемочного и проходческого участков проведено в соответствии с «Методикой имитационного моделирования режимов генерирования ВГС в ЭТС угольных шахт».

Имитационная модель ЭТС выемочного участка для исследования режимов генерирования ВГС, приведенная на рис. 10, состоит из: источника напряжения; участков понизительных подстанций энергопоезда; кабельных линий; коммутационных аппаратов; подсистем, имитирующих работу выемочного комбайна, забойного конвейера, дробилки, перегружателя, станции орошения, системы освещения, маслостанции крепи.

На основании анализа энергетических показателей технологического оборудования выемочных участков определены диапазоны их изменения, которые составляют: для выемочного комбайна – уровень напряжения 3,3 кВ, мощность регулируемых приводов 20 – 120 кВт, мощность нерегулируемых приводов 104 – 1016 кВт; забойных конвейеров - уровень напряжения 1,14 кВ, мощность регулируемых приводов 100 – 1100 кВт, мощность нерегулируемых приводов 250 – 2500 кВт; перегружателей - уровень напряжения 1,14 кВ, мощность регулируемых приводов 200 – 525 кВт.

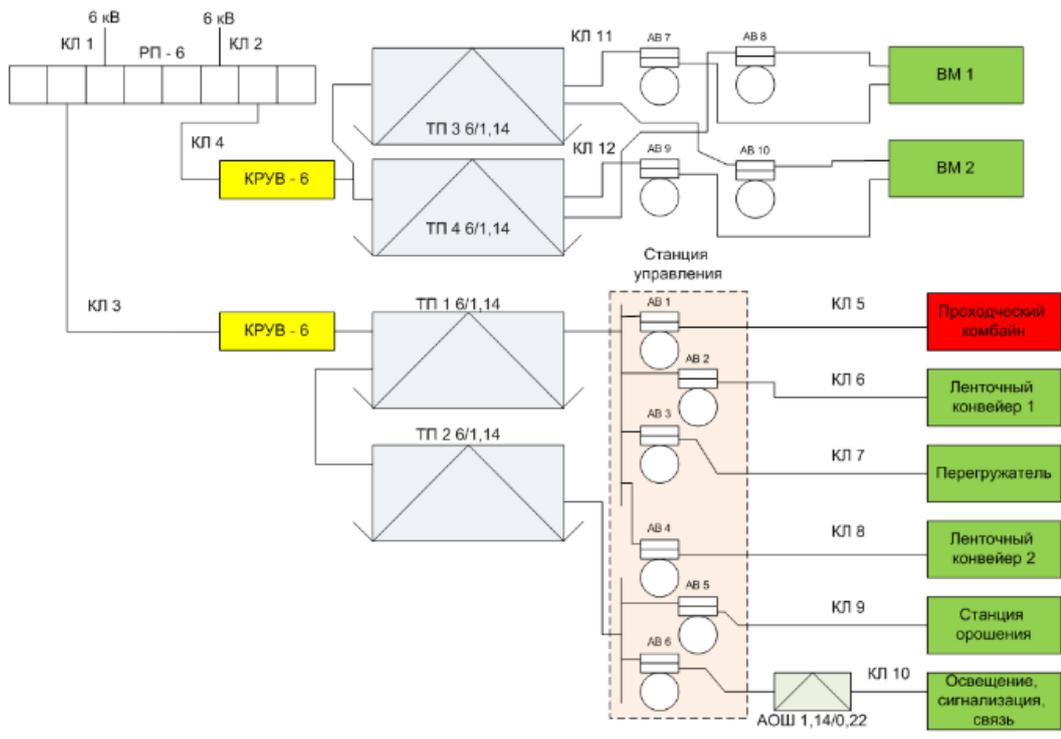


Рисунок 9 – Структурная схема ЭТС проходческого участка угольной шахты

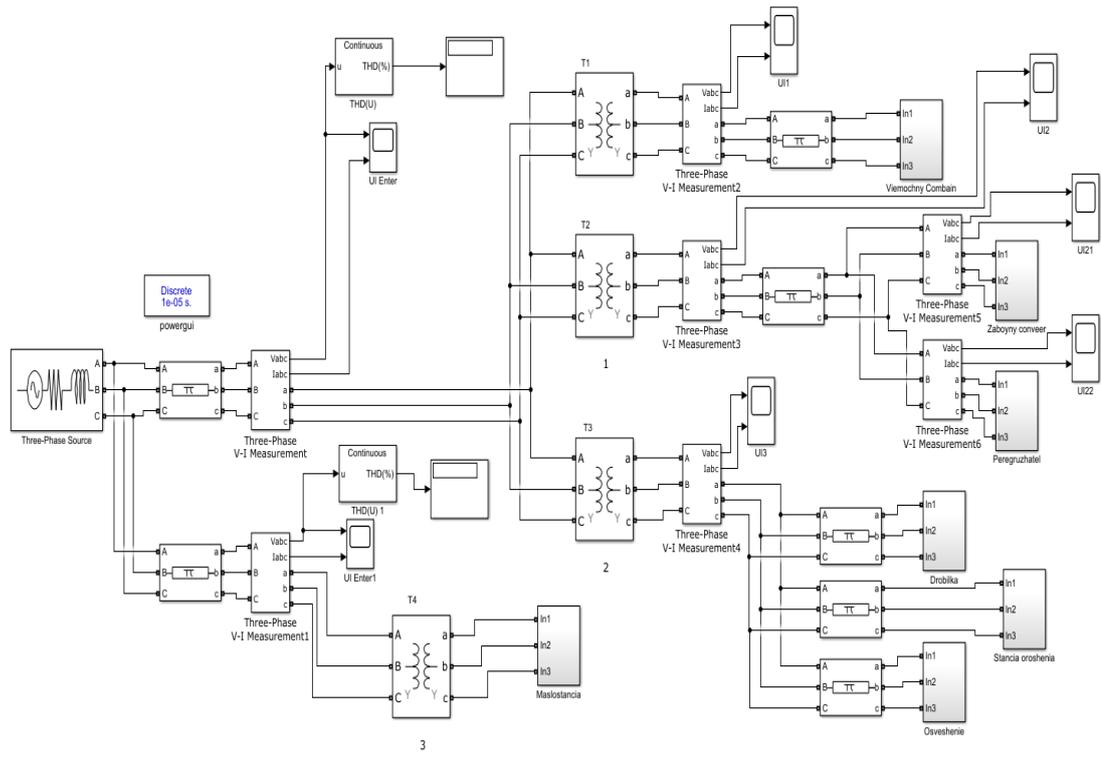


Рисунок 10 – Имитационная модель ЭТС для исследования режимов генерирования ВГС в электрической сети выемочного участка

При моделировании режимов генерирования ВГС получены зависимости K_U подземных технологических электропотребителей от мощности регулируемого и нерегулируемого приводов выемочных комбайнов и забойных конвейеров.

Геометрической интерпретацией зависимости $K_{U_{BK}}$ от мощности приводов (регулируемого) подачи ($P_{п.п.}$) и (нерегулируемого) резания ($P_{п.р.}$) выемочного комбайна является поверхность в трехмерном пространстве, приведенная на рис. 11.

Зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения, генерируемых преобразовательным устройством схемы управления электроприводом выемочного комбайна ($K_{U_{BK}}$) от мощности привода подачи ($P_{п.п.}$) при фиксированной мощности резания ($P_{п.р.}=1000$ кВт) описывается выражением:

$$K_{U_{BK}}=0,32+0,025* P_{п.п.} \quad (3)$$

Зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения, генерируемых преобразовательным устройством схемы управления электроприводом выемочного комбайна ($K_{U_{BK}}$) от мощности резания ($P_{п.р.}$) при фиксированной мощности привода подачи ($P_{п.п.}=120$ кВт) описывается выражением:

$$K_{U_{BK}}=5,29-0,0022* P_{п.р.} \quad (4)$$

Анализ результатов моделирования показал, что суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения ($K_{U_{BK}}$) имеет значения (за исключением значения 5,197 % при $P_{п.п.}=120$ кВт и $P_{п.р.}=100$ кВт), не превышающие требуемые ГОСТ 32144-2013, равное 5 %.

Геометрической интерпретацией зависимости $K_{U_{ЗК}}$ от мощности привода основного ($P_{п.п.}$) и вспомогательного ($P_{п.р.}$) забойного конвейера является поверхность в трехмерном пространстве, приведенная на рис. 12.

Зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения, генерируемых преобразовательным устройством схемы управления электроприводом забойного конвейера ($K_{U_{ЗК}}$), от мощности основного привода ($P_{о.п.}$) при фиксированной мощности вспомогательного привода ($P_{в.п.}=1100$ кВт) имеет вид:

$$K_{U_{ЗК}} = 28,38 - 0,005*P_{о.п.} \quad (5)$$

Зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения, генерируемых преобразовательным устройством схемы управления электроприводом забойного конвейера ($K_{U_{ЗК}}$), от мощности основного привода ($P_{в.п.}$) при фиксированной мощности вспомогательного привода ($P_{о.п.}=2500$ кВт) имеет вид:

$$K_{U_{ЗК}}=8,69+0,0076*P_{в.п.} \quad (6)$$

Анализ результатов моделирования показал, что суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения ($K_{U_{ЗК}}$) превышает требуемое ГОСТ 32144-2013, равное 5 %.

Зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения ($K_{U_{п.}}$) от мощности привода ($P_{п.}$) перегружателя в виде функции $K_{U_{п.}}=f(P_{п.})$ приведена на рис. 13.

Зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения, генерируемых преобразовательным устройством схемы управления электроприводом перегружателя ($K_{U_{п.}}$), от мощности привода перегружателя описывается выражением:

$$K_{U_{п.}}=14,125+0,089* P_{п.} \quad (7)$$

Анализ результатов моделирования показал, что суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения ($K_{U_{п.}}$) превышает требуемое ГОСТ 32144-2013, равное 5 %.

Таким образом, в выемочном участке источниками генерирования ВГС, значения которых превышают требуемое по ГОСТ 32144-2013, равное 5 %, являются забойный конвейер и перегружатель.

Имитационная модель ЭТС проходческого участка для исследования режимов генерирования ВГС, приведенная на рис. 14, состоит из: источника напряжения; участковых понизительных подстанций энергопоезда;

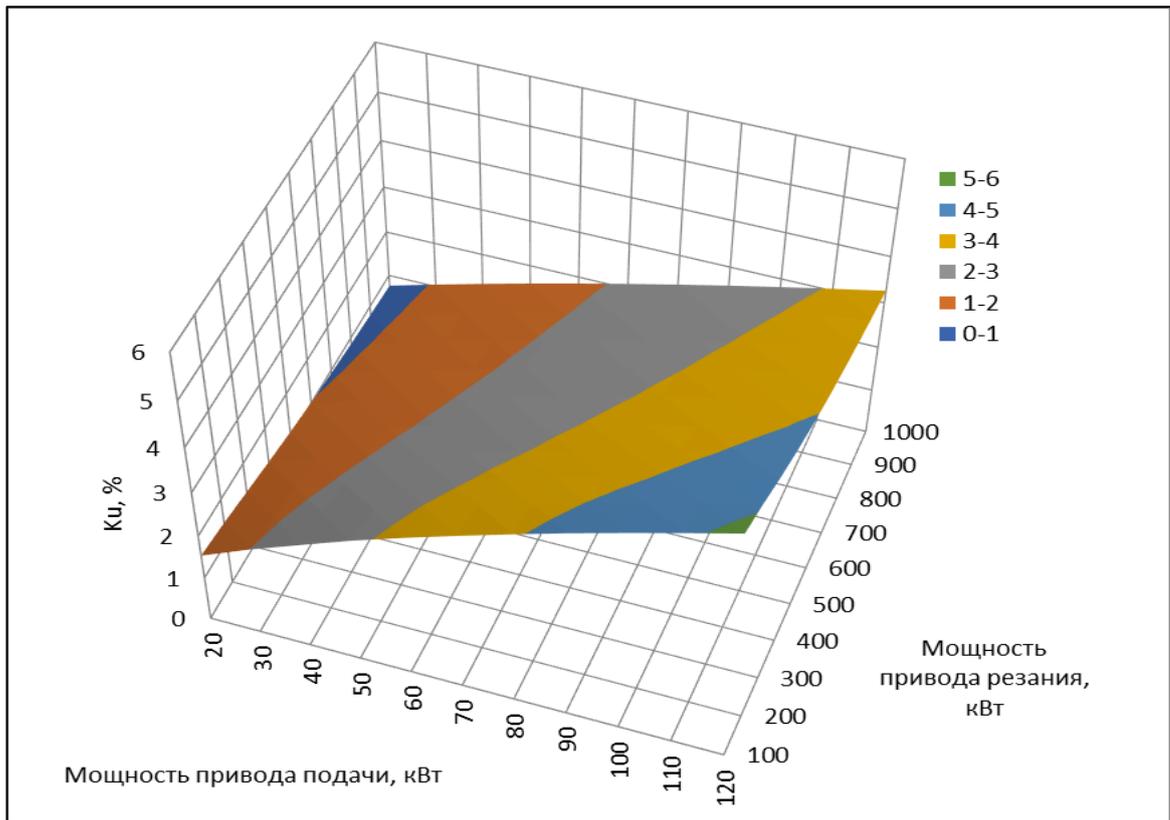


Рисунок 11 – Геометрическая интерпретация зависимости суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения от мощности приводов подачи (регулируемого) и резания (нерегулируемого) выемочного комбайна, $K_{U_{ВК}} = f(P_{п.п.}, P_{п.р.})$

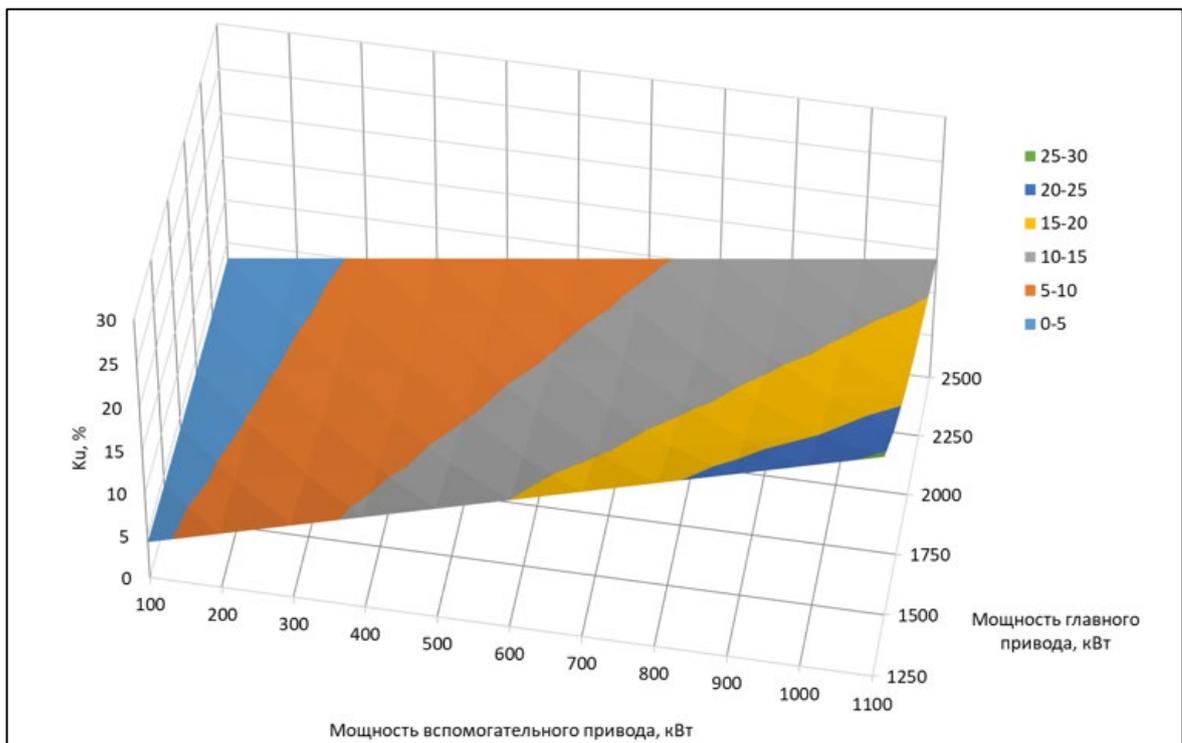


Рисунок 12 – Геометрическая интерпретация зависимости суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения от мощности приводов основного и вспомогательного забойного конвейера, $K_{U_{ЗК}} = f(P_{о.п.}, P_{в.п.})$

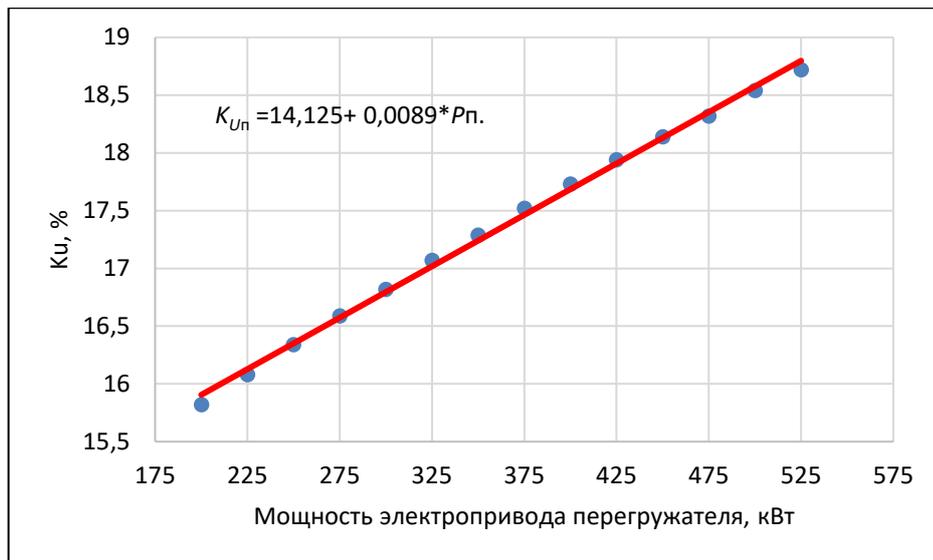


Рисунок 13 – Зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_{UH}) от мощности привода перегружателя
 $K_{UH} = f(P_n)$

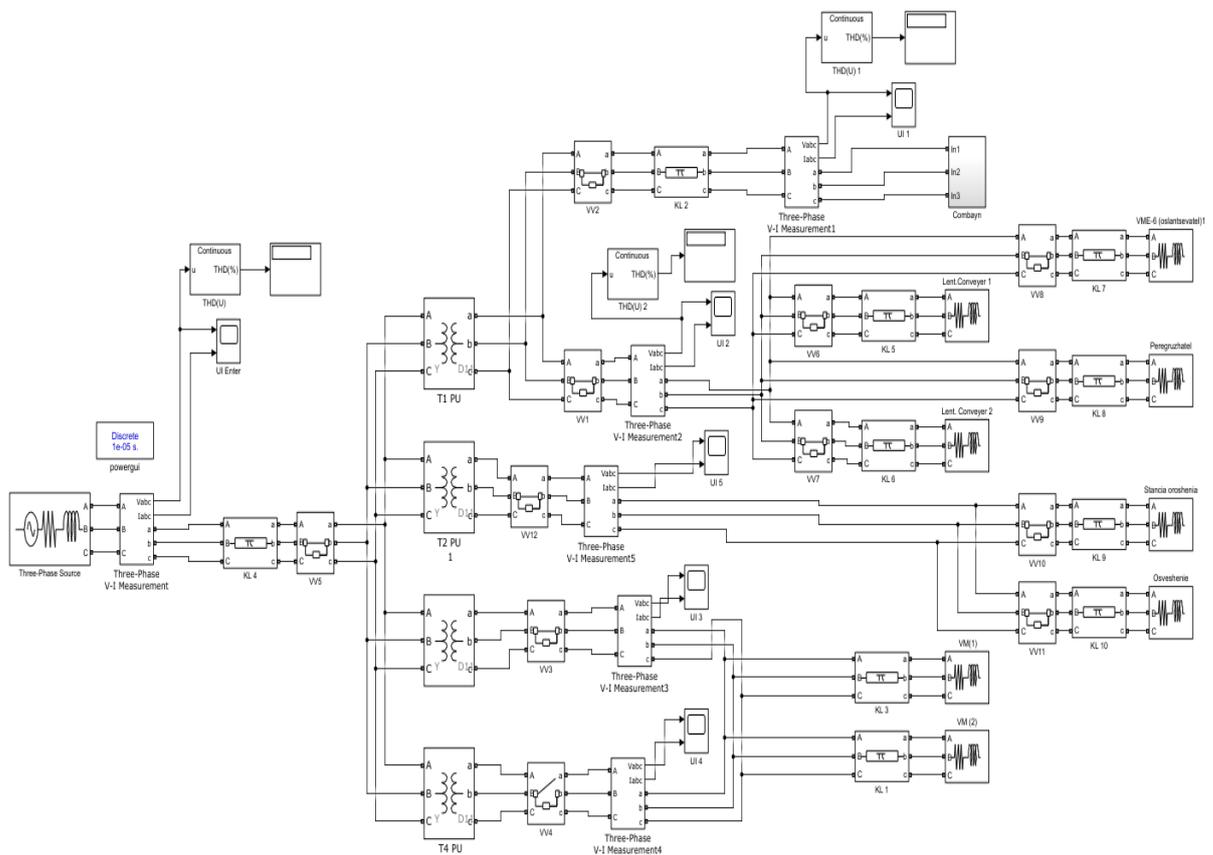


Рисунок 14 – Имитационная модель ЭТС для исследования режимов генерирования ВГС в электрической сети проходческого участка

кабельных линий; линейных нагрузок технологического оборудования (ленточного конвейера №1, ленточного перегружателя, ленточного конвейера №2, станции орошения, вентиляторов местного проветривания, системы освещения) и подсистемы, имитирующей работу проходческого комбайна.

На основании анализа энергетических показателей технологического оборудования выемочных участков определены диапазоны их изменения, которые составляют: для проходческого комбайна – уровень напряжения 1,14 кВ, мощность регулируемого привода 20 – 96 кВт; мощность нерегулируемого привода 125 – 400 кВт.

При моделировании режимов генерирования ВГС получены зависимости K_U подземных технологических электропотребителей от мощности регулируемого и нерегулируемого приводов проходческого комбайна.

Геометрической интерпретацией зависимости суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения ($K_{U_{пк}}$) от мощности приводов нерегулируемых ($P_{н.п.}$) и регулируемых ($P_{р.п.}$) проходческого комбайна является поверхность в трехмерном пространстве, приведенная на рис. 15.

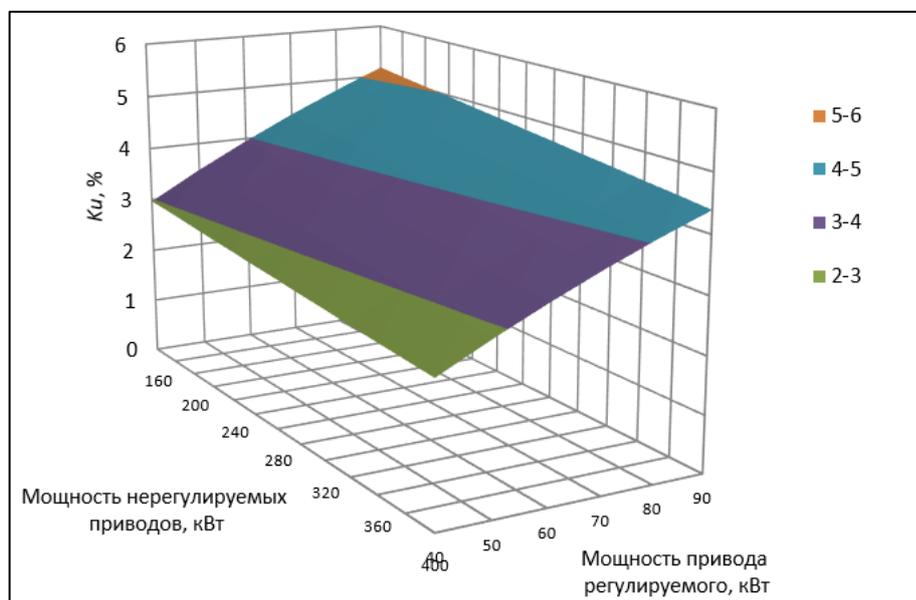


Рисунок 15 – Геометрическая интерпретация зависимости суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения от мощности приводов нерегулируемого и регулируемого проходческого комбайна, $K_{U_{пк}} = f(P_{н.п.}, P_{р.п.})$

Зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения, генерируемых преобразовательным устройством схемы управления электроприводом проходческого комбайна ($K_{U_{пк}}$), от мощности регулируемого привода ($P_{р.п.}$) для фиксированных значений нерегулируемого привода ($P_{н.п.} = 260$ кВт) описывается выражением:

$$K_{U_{пк}} = 2,824 + 0,0504 * P_{р.п.} \quad (8)$$

Зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения, генерируемых преобразовательным устройством схемы управления электроприводом проходческого комбайна ($K_{U_{пк}}$), от мощности нерегулируемого привода ($P_{н.п.}$) при фиксированных значениях регулируемого привода ($P_{р.п.} = 60$ кВт.) описывается выражением:

$$K_{U_{пк}} = 11,205 - 0,0191 * P_{н.п.} \quad (9)$$

Анализ результатов моделирования показал, что суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения ($K_{U_{пк}}$) имеет значения, не превышает 5 %, требуемое ГОСТ 32144-2013.

Исследования режимов генерирования ВГС в подземных участковых ЭТС угольных шахт показали, что значения суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения превышают требуемое значение, установленное ГОСТ 32144-2013, в 1,86 – 2,7 раза. В связи с этим целесообразно провести обоснование применения ФКУ и его параметров в подземных участковых ЭТС.

Разработана методика выбора средств повышения качества электроэнергии в подземных участковых электрических сетях, блок-схема которой приведена на рис. 16.

Методика выбора средств повышения показателей качества электроэнергии в подземных участковых ЭТС (п.1 – 21) включает: измерение ПКЭ и коэффициента мощности в подземных участковых ЭТС; определение объема компенсации реактивной мощности; установление несоответствия ПКЭ требованиям ГОСТ 32144–2013; разработку имитационной модели подземной участковой ЭТС; моделирование режимов генерирования ВГС в подземной участковой ЭТС; корректировку (при необходимости) параметров имитационной модели подземной участковой ЭТС; выбор ФКУ, установление параметров ФКУ, определение места установки ФКУ; моделирование режимов генерирования ВГС в подземной участковой ЭТС с ФКУ; моделирование режимов генерирования ВГС в подземной участковой ЭТС с ФКУ с оценкой соответствия требованиям ГОСТ 32144–2013; оценку сходимости результатов моделирования с результатами экспериментальных исследований ПКЭ; разработку рекомендаций по повышению ПКЭ в подземной участковой ЭТС.

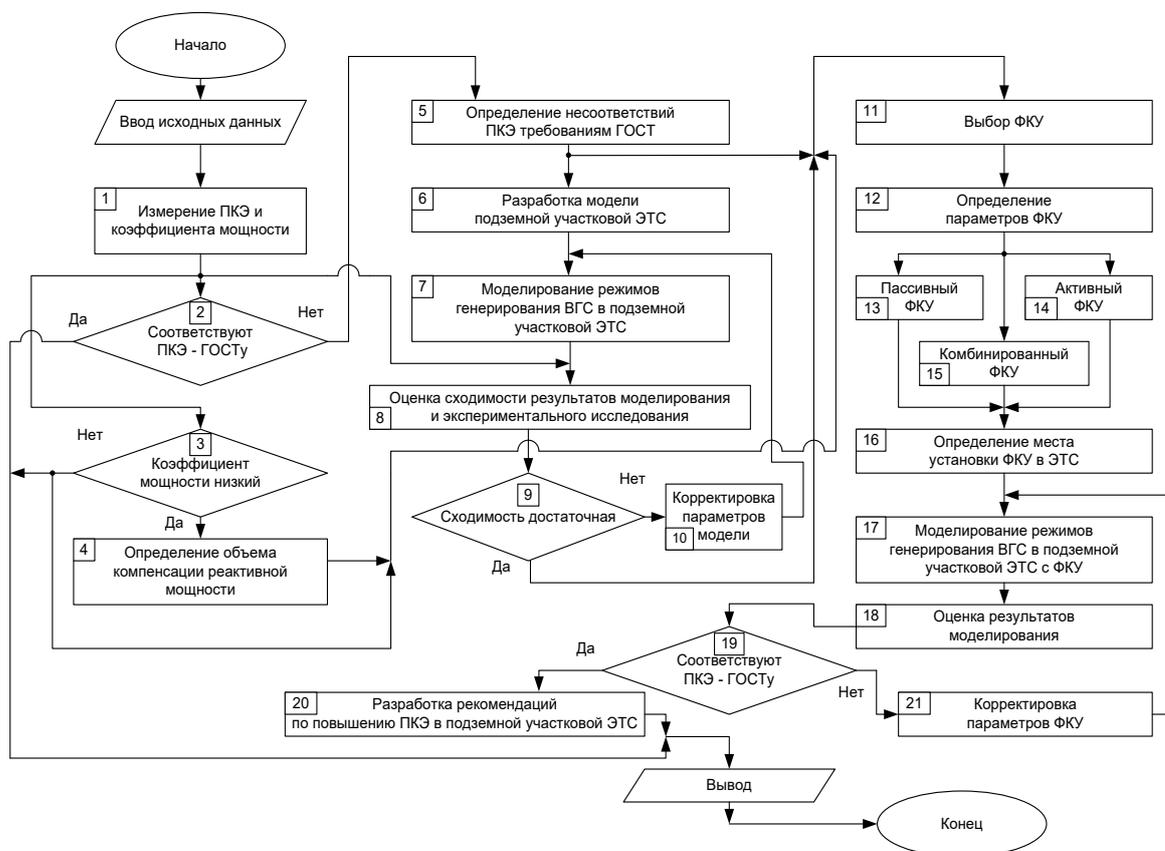


Рисунок 16 - Блок-схема методики выбора средств повышения качества электроэнергии в подземных участковых ЭТС

Имитационная модель ЭТС выемочного участка угольной шахты для исследования возможности ограничения уровня ВГС с применением ФКУ (рис. 17) состоит из: трехфазного программируемого источника переменного напряжения, с помощью которого задается напряжение, поступающее на выемочный участок (*3-Phase Source*); трехфазных универсальных измерителей (*Three-Phase V-I Measurement*), которые позволяют оценить формы сигнала на источнике и в ключевых точках ЭТС выемочного участка; осциллографов *Scope*; анализаторов *KU*; системы *Powergui*, служащей для дополнительного анализа, в том числе по гармоническому составу имитационной модели. В имитационной модели также присутствует ряд элементов устройства повышения качества электроэнергии: пассивный ФКУ с соединением элементов в треугольник, настроенный на подавление 5 и 7 гармоник; АФВГ: *Three-Phase Series AFVG* – вводной дроссель АФВГ; *Universal Bridge AFVG* – активный выпрямитель выполнен на 6 IGBT, соединённых по трехфазной мостовой схеме; *C AFVG* – емкостной накопитель АФВГ; комбинированного фильтрокомпенсирующего устройства (КФКУ), состоящий из пассивного ФКУ и АФВГ.

При моделировании принято допущение, что сопротивлением коммутационных аппаратов, соединительных проводников внутри электрооборудования можно пренебречь.

Имитационная модель ЭТС выемочного участка позволяет определять ПКЭ в подземных электрических сетях угольных шахт при использовании различных видов ФКУ (ПФКУ, АФВГ, КФКУ).

Моделирование режимов генерирования ВГС показало, что применение ПФКУ для повышения ПКЭ в ЭТС выемочного участка обуславливает повышение уровня питающего напряжения, выше допустимого по ГОСТ 32144-2013 значения. Применение АФВГ для повышения ПКЭ в ЭТС выемочного участка не обеспечивает требуемого согласно ГОСТ 32144-2013 значения при уровне мощности нелинейной нагрузки выше 250 кВт.

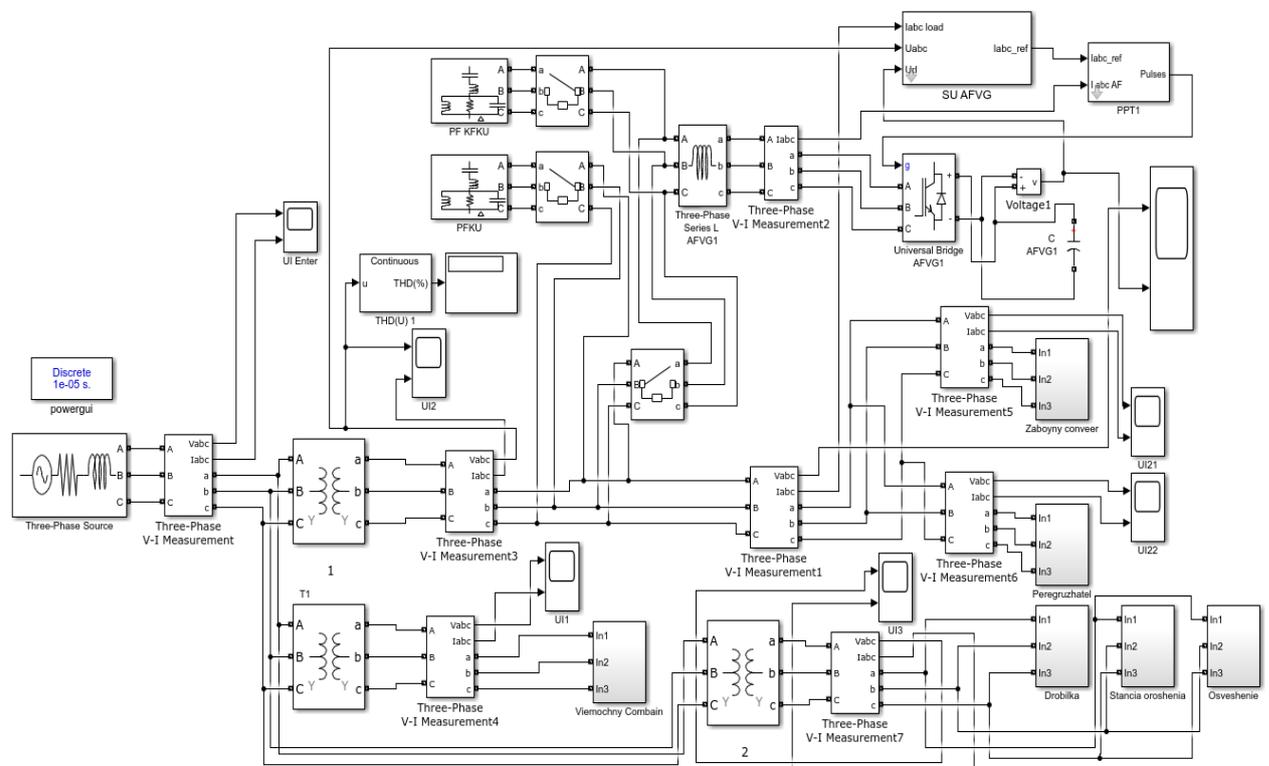


Рисунок 17 – Имитационная модель ЭТС выемочного участка угольной шахты для исследования возможности ограничения уровня ВГС с применением ФКУ

Применение КФКУ для повышения ПКЭ в ЭТС выемочного участка обеспечивает повышение ПКЭ, при этом уровень напряжения находится в допустимом диапазоне $1140 \pm 10\%V$.

С учетом того, что по ГОСТ 32144-2013 суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения (K_U) для электрических сетей напряжения 6 кВ не должен превышать 5 %, а для электрических сетей напряжением 0,4 кВ - 8 %, то для электрических сетей с напряжением 1,14 кВ при линейной итерации значение K_U может быть 6,1 %.

При моделировании режимов генерирования ВГС в подземных участковых ЭТС с применением комбинированного ФКУ получена зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения K_U на вторичной обмотке понизительной подстанции энергопоезда, питающей забойный конвейер и перегружатель, от мощностей нелинейной нагрузки и пассивного фильтра (ПФ) КФКУ в виде поверхности в трехмерном пространстве, которая приведена на рис. 18.

В качестве примера, на рис. 19 и 20 приведены: синусоида напряжения с искажениями; спектр гармонического состава по напряжению; значения суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) на вторичной обмотке трансформаторной подстанции энергопоезда, питающей забойный конвейер и перегружатель, до и после включения КФКУ.

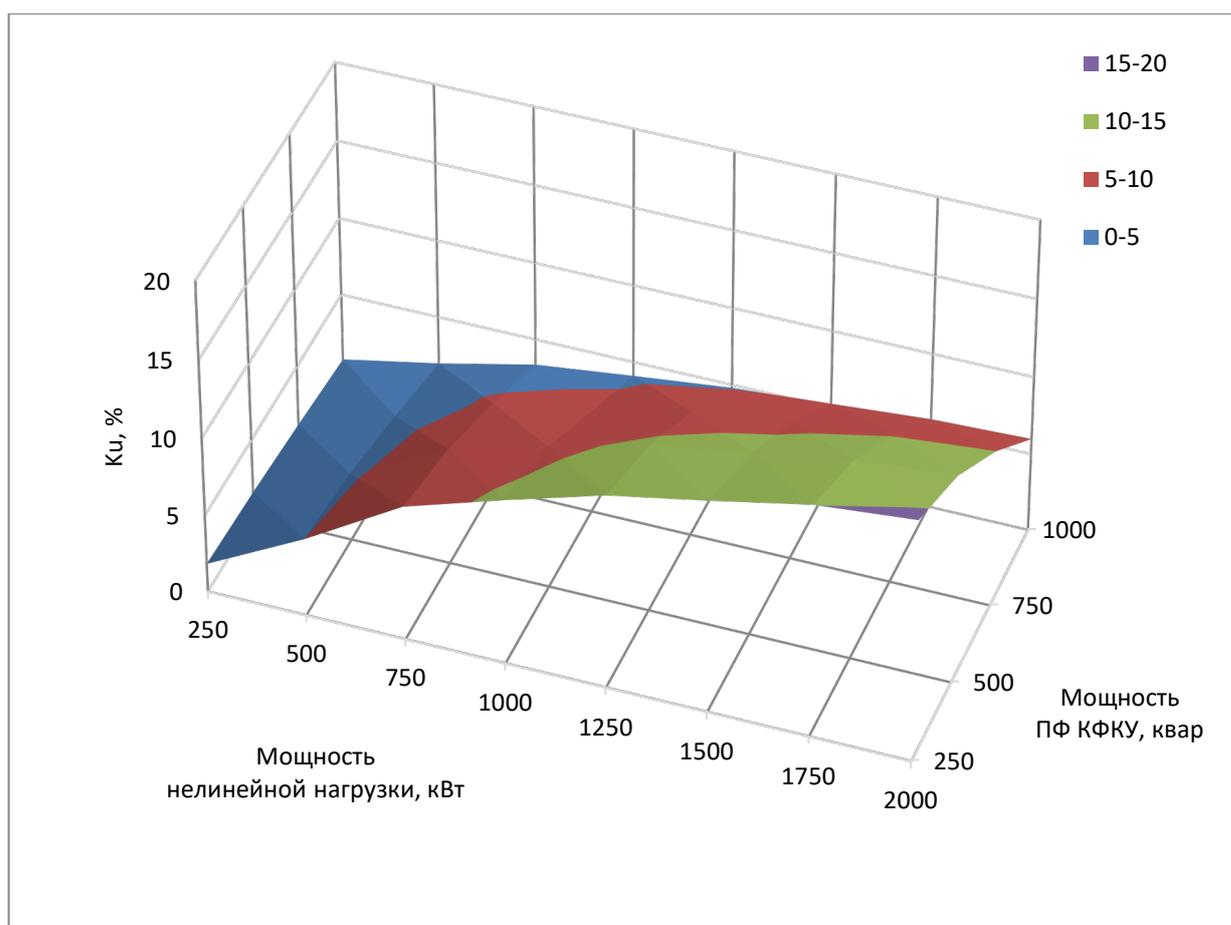


Рисунок 18 - Геометрическая интерпретация зависимости суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) от мощностей нелинейной нагрузки ($P_{н.н.}$) и ПФ КФКУ ($Q_{пф кфку}$), $K_U = f(P_{н.н.}, Q_{пф кфку})$

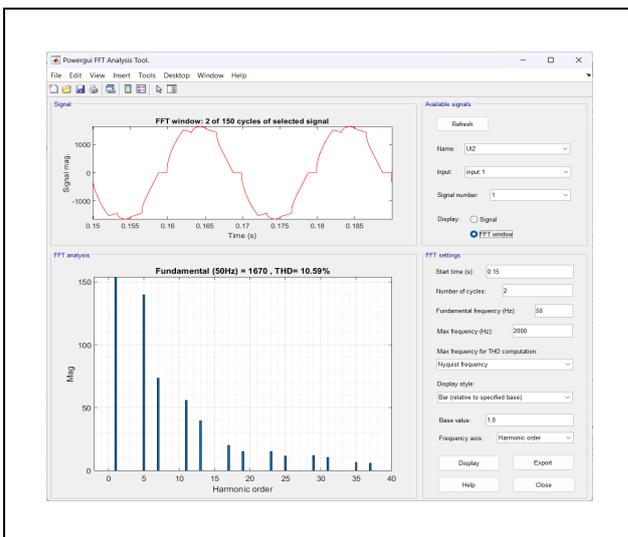


Рисунок 19 – Синусоида напряжения с искажениями, гармонический состав и суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения на вторичной обмотке понизительной подстанции энергопоезда, питающей забойный конвейер и перегружатель с отключенным комбинированным ФКУ

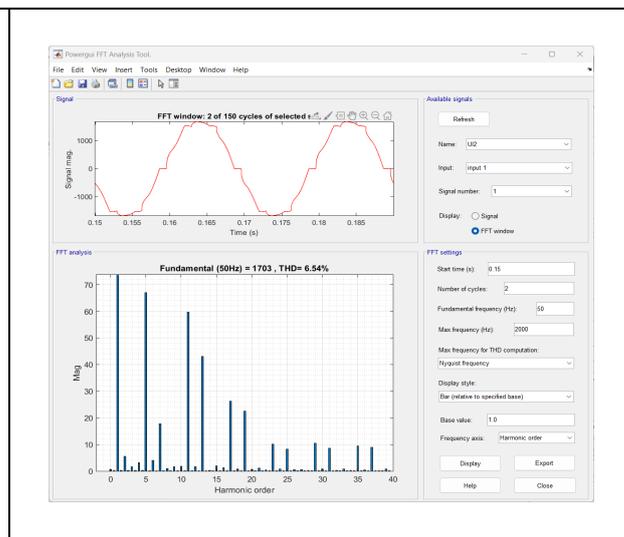


Рисунок 20 – Синусоида напряжения с искажениями, гармонический состав и суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения на вторичной обмотке понизительной подстанции энергопоезда, питающей забойный конвейер и перегружатель с включенным комбинированным ФКУ

Разработанные имитационные модели генерирования ВГС в ЭТС выемочных участков без ФКУ и с комбинированным ФКУ позволило снизить значение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) в 1,62 раза при уровне отклонения напряжения не выше требуемого ГОСТ 32144-2013.

Выводы по главе 4.

1. Разработаны имитационные модели для исследования режимов генерирования ВГС преобразовательными устройствами систем электропривода добычного и проходческого оборудования, позволяющие выполнять оценку ПКЭ в участковых подземных сетях угольных шахт.
2. Установлены в виде геометрических трехмерных поверхностей зависимости суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения K_U от линейной и нелинейной нагрузки технологического оборудования выемочных и проходческих участков угольных шахт.
3. Разработана методика выбора средств повышения показателей качества электроэнергии в подземных участковых ЭТС.
4. Разработана имитационная модель для исследования режимов генерирования ВГС с учетом их компенсации ФКУ, в условиях подземных участковых электрических сетей.
5. Выполнено обоснование применения комбинированных ФКУ для повышения ПКЭ в подземных участковых электрических сетях напряжением 1,14 кВ с обеспечением допустимого уровня K_U , при линейной итерации 6,1 %.
6. Доказана эффективность функционирования комбинированного ФКУ в ЭТС выемочного участка, заключающаяся в снижении суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения K_U в 1,62 раза, при этом уровень питающей напряжения не превысил допустимое значение, равное $\pm 10\%$.
6. Установлена зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) с учетом мощностей нелинейной нагрузки ($P_{н.н.}$) и пассивного фильтра комбинированного ФКУ ($Q_{фку}$).

7. Выполненное исследование результатов имитационного моделирования режимов генерирования ВГС преобразовательными устройствами систем управления электроприводами технологического оборудования подземного комплексов с результатами экспериментальных исследований, показало достаточный уровень адекватности разработанных имитационных моделей ЭТС угольных шахт, при сходимости на уровне 0,90 - 0,93 и погрешности моделирования от 0,09 до 12,58 %.

В пятой главе выполнено исследование режимов генерирования ВГС в электрических сетях угольных шахт для обоснования параметров и применения ФКУ.

На основе анализа ЭТС угольных шахт Кузнецкого, Донецкого, Воркутинского, Карагандинского угольных бассейнов установлены наиболее распространенные схемы электроснабжения угольных шахт, с применением двухобмоточных и трехобмоточных силовых трансформаторов на главной понизительной подстанции (ГПП), одногоризонтной с наличием скважин на флангах шахтного поля для питания подземных потребителей. Наиболее распространенные ЭТС угольной шахты приведены на рис. 21 и 22.

В состав структур ЭТС угольной шахты входят следующие элементы:

И 1 – Источник 1 высокого напряжения угольной шахты; И 2 – Источник 2 высокого напряжения угольной шахты; НЭПК 1 – Нагрузка электропотребителей поверхностного комплекса, фидер 1; НЭПК 2 – Нагрузка электропотребителей поверхностного комплекса, фидер 2; ГПП – Главная понизительная подстанция; ЦПП – Центральная подземная подстанция; ГВУ 1 – Главная вентиляторная установка, №1; ГВУ 2 – Главная вентиляторная установка, № 2; ШПУ 1 – Шахтная подъемная установка, № 1 (скиповая); ШПУ 2 – Шахтная подъемная установка, № 2 (клетевая); ВУ – Выемочный участок; УКТ – Участок конвейерного транспорта; ПУ 1 – Проходческий участок 1; ПУ 2 – Проходческий участок 2; УВ – Участок водоотлива; ЭОД 1 – Электропотребители околоствольного двора, ввод 1; ЭОД 2 – Электропотребители околоствольного двора, ввод 2; ВВ – высоковольтный выключатель; СВ – секционный выключатель; ВЛ – воздушная линия; КЛ – кабельная линия.

Приведенные структуры ЭТС угольной шахты с использованием двухобмоточных и трехобмоточных силовых трансформаторов на ГПП легли в основу построения имитационных моделей ЭТС угольной шахты для моделирования режимов генерирования ВГС потребителями с нелинейной нагрузкой.

Имитационная модель ЭТС угольной шахты с двухобмоточными трансформаторами на ГПП для исследования режимов генерирования ВГС в электрических сетях поверхностного и подземного комплексов приведена на рис. 23.

Имитационная модель ЭТС угольной шахты с трехобмоточными трансформаторами на ГПП для исследования режимов генерирования ВГС в электрических сетях поверхностного и подземного комплексов приведена на рис. 24.

В результате имитационного моделирования ЭТС угольных шахт с двухобмоточными трансформаторами на ГПП получены значения суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) для всего диапазона мощностей ШПУ и длин кабельных линий от ЦПП до выемочного участка. Для имитационного моделирования приняты следующие параметры: мощность ШПУ в диапазоне от 1000 до 6000 кВт; длина кабельной линии от ЦПП до выемочного участка в диапазоне от 1000 м до 5000 м.

Геометрической интерпретацией зависимости суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения $K_{U_{гпп}}$ от мощности приводов ШПУ и длины кабельной линии от ЦПП до выемочного участка на шинах ГПП (6 кВ) с двухобмоточными трансформаторами является поверхность в трехмерном пространстве, приведенная на рис.25.

Анализ результатов показывает, что суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения ($K_{U_{гпп}}$) имеет значения от 5,55 % до 17,41 %, что превышает требуемое ГОСТ 32144-2013.

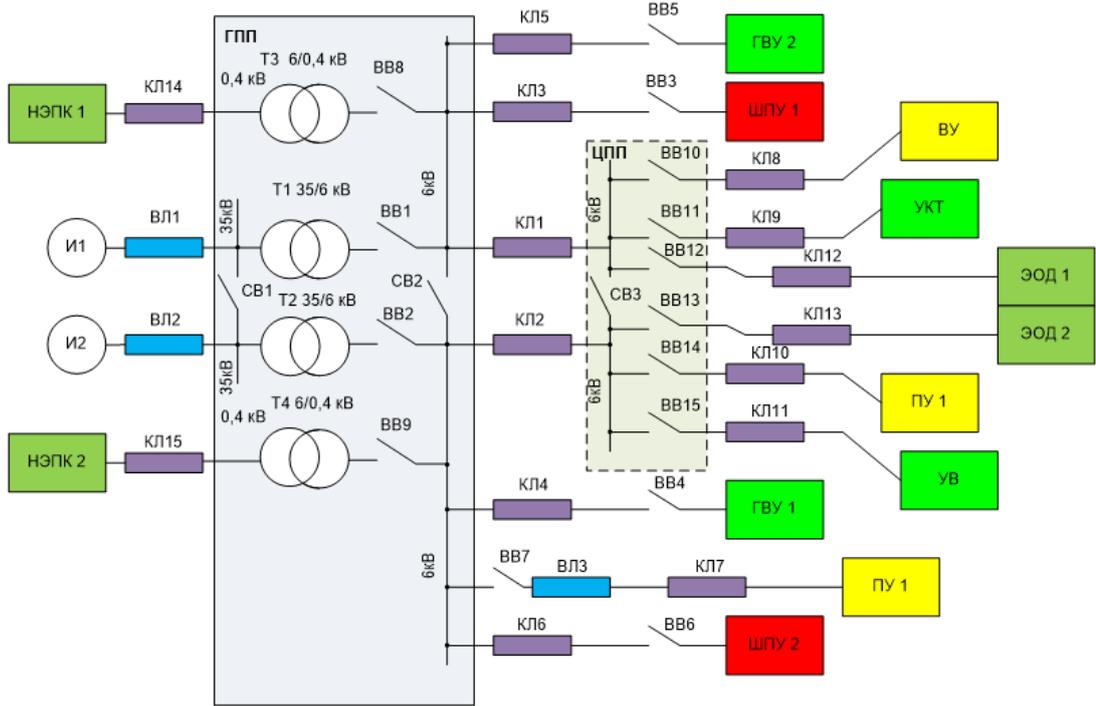


Рисунок 21 – Структура ЭТС угольной шахты с двухобмоточными трансформаторами на ГПП

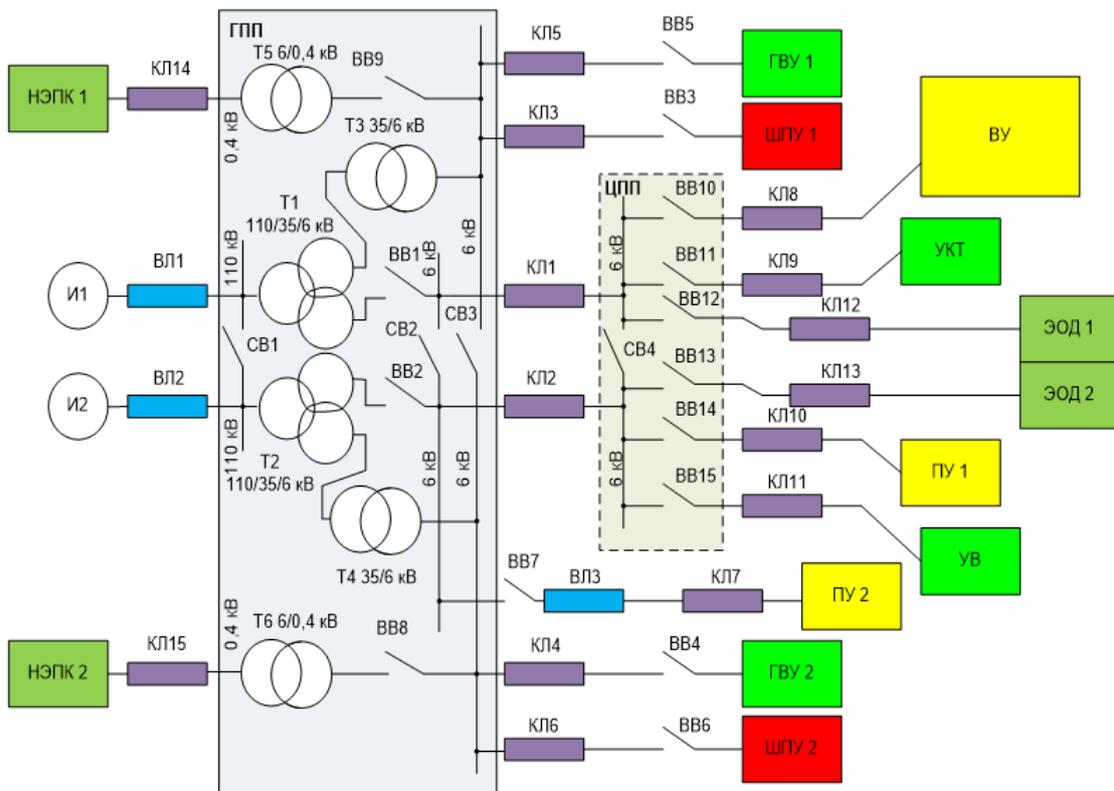


Рисунок 22 – Структура ЭТС угольной шахты с трехобмоточными трансформаторами на ГПП

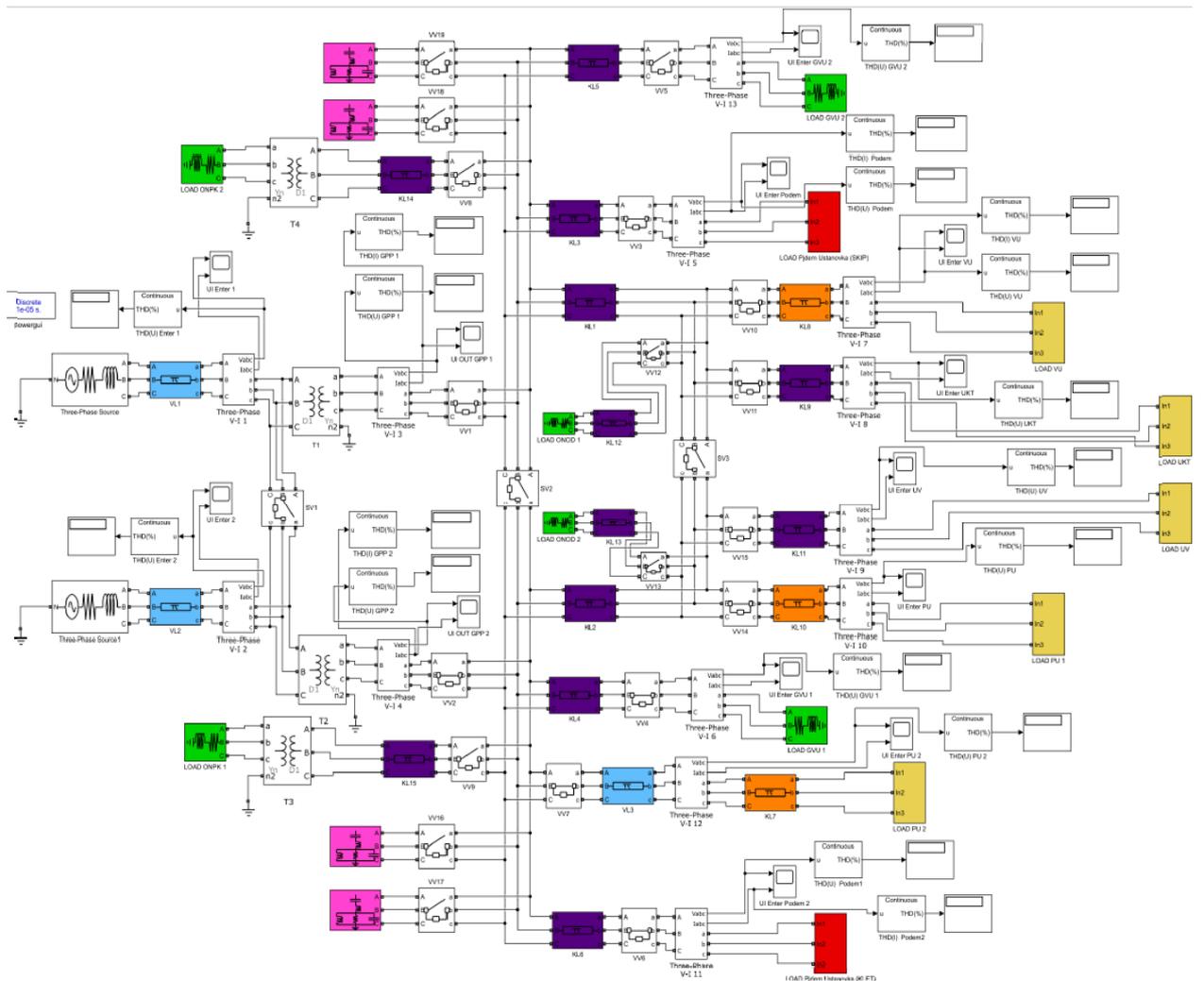


Рисунок 23 – Имитационная модель ЭТС угольной шахты с двухобмоточными трансформаторами на ГПП для исследования режимов ВЭС в электрических сетях поверхностного и подземного комплексов

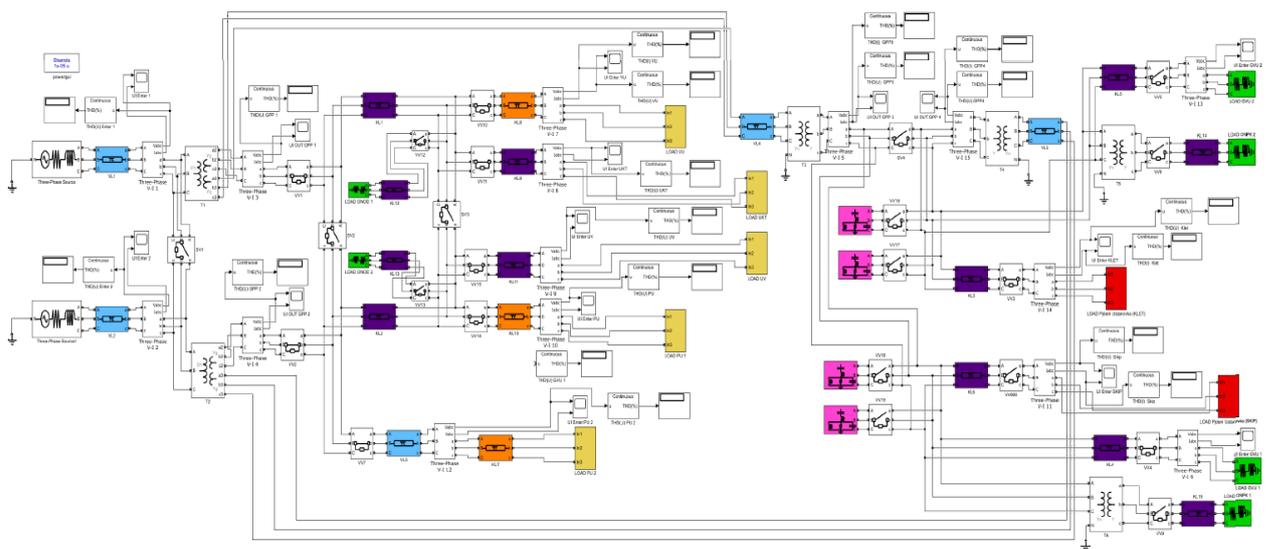


Рисунок 24 – Имитационная модель ЭТС угольной шахты с трехобмоточными трансформаторами на ГПП для исследования режимов ВЭС в электрических сетях поверхностного и подземного комплексов

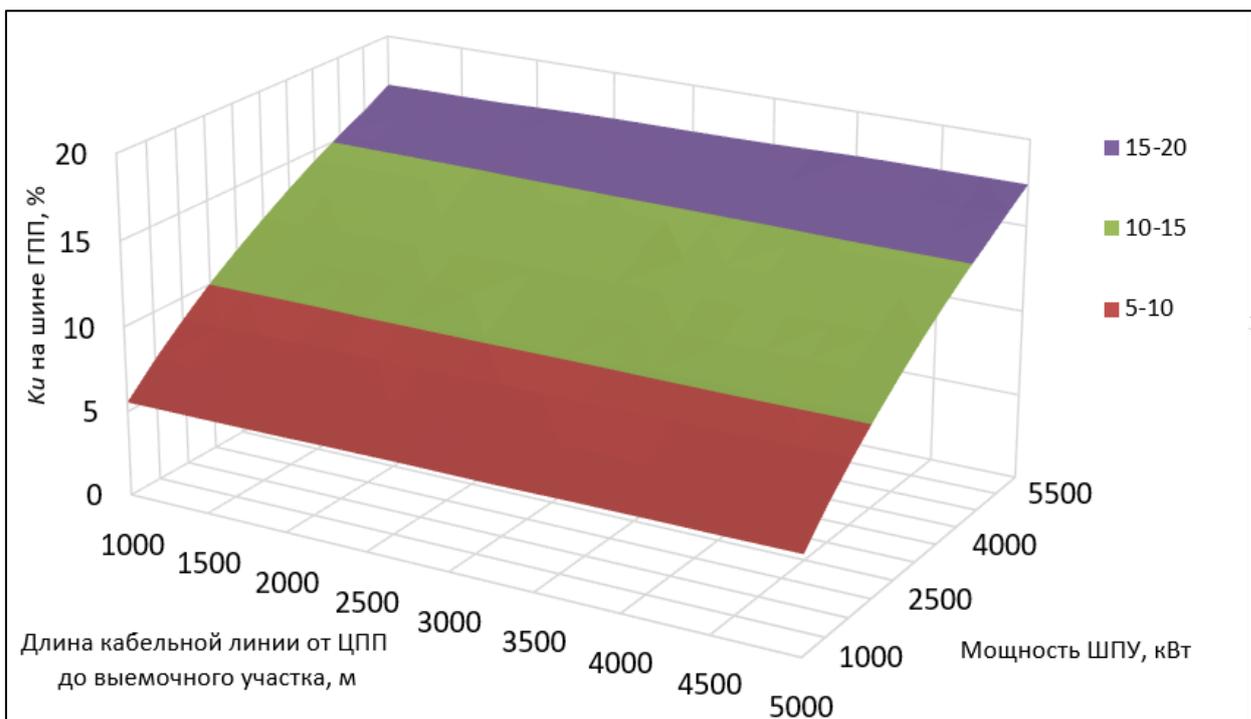


Рисунок 25 – Геометрическая интерпретация зависимости суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения ($K_{U_{ГПП}}$) на шинах ГПП с двухобмоточными трансформаторами от мощности ШПУ и длины кабельной линии от ЦПП до выемочного участка $K_{U_{ГПП}} = f(P_{шпу}, L_{кл.ву})$

В результате имитационного моделирования ЭТС угольных шахт с трехобмоточными трансформаторами на ГПП получены значения суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) для всего диапазона мощности ШПУ и длины линии от ГПП до ШПУ. Для моделирования приняты следующие параметры: мощность ШПУ ($P_{шпу.}$) в диапазоне от 1000 до 6000 кВт; длина линии ($L_{л.}$) от ГПП до ШПУ - от 100 м до 1000 м.

Геометрической интерпретацией зависимости $K_{U_{шпу}}$ от мощности приводов ШПУ и длины линии от ГПП до ШПУ на шинах ГПП (6 кВ) с трехобмоточными трансформаторами является поверхность в трехмерном пространстве, приведенная на рис. 26.

Анализ результатов показывает, что суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения ($K_{U_{шпу}}$) находится в диапазоне от 6,82 % до 18,70 %, что превышает требуемое ГОСТ 32144–2013.

Выполнено исследование режимов генерирования уровней ВГС при применении ФКУ в ЭТС угольных шахт с двухобмоточными и трехобмоточными трансформаторами на ГПП. Получены значения суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) для диапазона мощностей ШПУ и пассивного ФКУ, настроенного на ограничение 5, 7, 11 и 13 высших гармоник. Для моделирования приняты следующие параметры: мощность ШПУ в диапазоне от 1000 до 6000 кВт; мощность пассивного ФКУ в диапазоне от 500 до 6000 квар.

Геометрической интерпретацией зависимости суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) на шинах с двухобмоточными трансформаторами ГПП (6 кВ) от мощностей ШПУ ($P_{шпу}$) и ФКУ ($Q_{фку}$) является поверхность в трехмерном пространстве, приведенная на рис. 27.

Результаты моделирования показывают, что коэффициент суммарного значения гармонических составляющих напряжения (K_U) находится в диапазоне от 0,63 % до 10,82 % и в ряде измерений превышает нормируемое в ГОСТ 32144–2013 значение, равное 5 %.

Значения ПКЭ до и после включения ФКУ приведены в табл. 3.

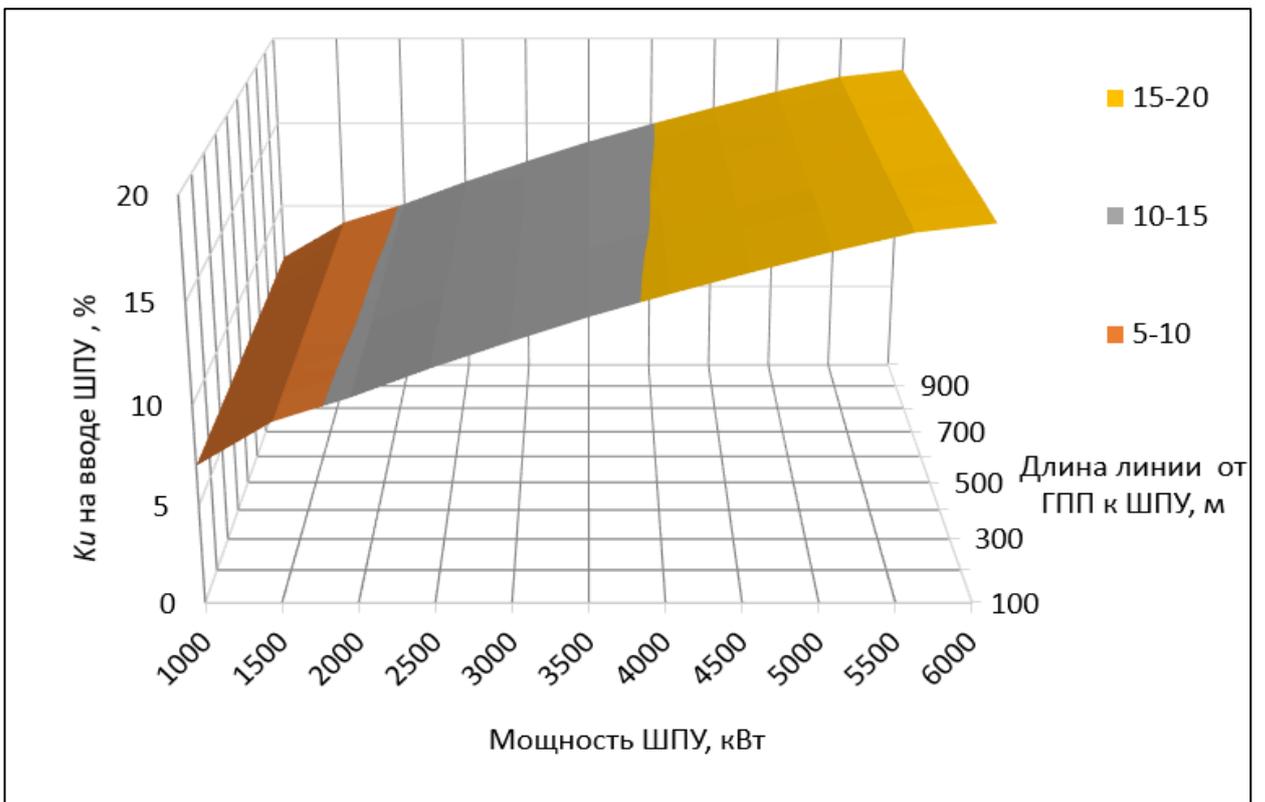


Рисунок 26 – Геометрическая интерпретация зависимости суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) на вводе ШПУ от мощности ШПУ и длины линии от ГПП с трехобмоточными трансформаторами до ШПУ $K_U = f(P_{\text{ШПУ}}, L_{\text{л}})$

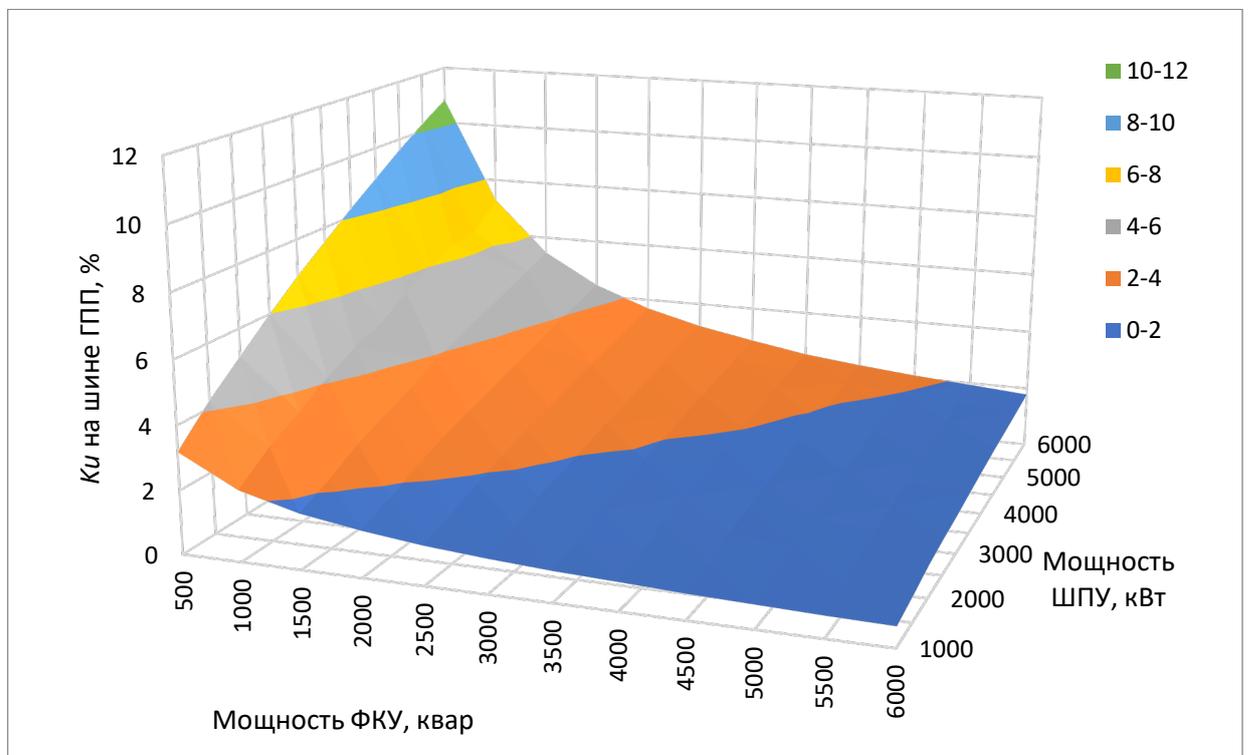


Рисунок 27 – Геометрическая интерпретация зависимости суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) на шинах ГПП (6 кВ) с учетом мощностей ШПУ ($P_{\text{ШПУ}}$) и ФКУ ($Q_{\text{ФКУ}}$) $K_{U\text{ГПП}} = f(P_{\text{ШПУ}}, Q_{\text{ФКУ}})$

Таблица 3 - Значения ПКЭ до и после включения ФКУ

| Точка контроля ¹⁾ | ФКУ отключено | | | | ФКУ включено | | | |
|-------------------------------|--------------------|--------------------------|-------------------|--------------|--------------------|--------------------------|-------------------|--------------|
| | U_{ϕ} , кВ | $U_{\phi} - U_H$, кВ | δU , % | K_U , % | U_{ϕ} , кВ | $U_{\phi} - U_H$, кВ | δU , % | K_U , % |
| Шины ГПП (6 кВ) (1 секция) | 6,10 | -0,50 | -8,41 | 13,74 | 6,48 | -0,12 | -1,98 | 3,39 |
| ШПУ 1 | 5,93 | -0,67 | -11,2 | 15,57 | 6,11 | -0,49 | -8,10 | 7,13 |
| ВУ | 6,04 | -0,56 | -9,35 | 10,39 | 6,38 | -0,23 | -3,75 | 2,65 |
| УКТ | 6,05 | -0,55 | -9,15 | 9,80 | 6,37 | -0,23 | -3,78 | 2,67 |
| Шины ГПП (6 кВ) (2 секция) | 6,06 | -0,54 | -9,07 | 9,49 | 6,42 | -0,18 | -2,97 | 2,11 |
| УВ | 6,06 | -0,54 | -9,06 | 9,39 | 6,42 | -0,18 | -2,95 | 2,07 |
| ГВУ | 6,06 | -0,54 | -9,06 | 9,31 | 6,43 | -0,17 | -2,78 | 2,00 |
| ПрУ 1 | 6,08 | -0,52 | -8,73 | 9,07 | 6,41 | -0,19 | -3,21 | 2,34 |
| ШПУ 2 | 5,96 | -0,65 | -10,75 | 14,21 | 6,12 | -0,48 | -8,01 | 7,09 |
| ПрУ 2 | 6,08 | -0,52 | -8,69 | 9,01 | 6,42 | -0,18 | -3,02 | 2,19 |

¹⁾ ШПУ 1 и ШПУ 2 – шахтная подъемная установка 1 и 2; ВУ – выемочный участок; УКТ – участок конвейерного транспорта; УВ – участок водоотлива; ГВУ – главная вентиляторная установка; ПрУ 1 и ПрУ 2 – проходческий участок 1 и 2.

Значения ПКЭ составили: на шинах ГПП (1 секция) до подключения ФКУ $\delta U=-8,41$ %, $K_U=13,74$ %, после подключения $\delta U=-1,98$ %, $K_U=3,39$ %; на шинах ГПП (2 секция) до подключения ФКУ $\delta U=-9,07$ %, $K_U=9,49$ %, после подключения $\delta U=-2,97$ %, $K_U=2,11$ %.

Анализ данных табл. 3 показывает эффективное снижение суммарного значения гармонических составляющих напряжения (K_U) при подключенном пассивном ФКУ.

Исследования подтверждают эффективность использования ФКУ для ограничения уровня ВГС в ЭТС угольных шахт с двухобмоточными и трехобмоточными трансформаторами на ГПП.

Выводы по главе 5.

1. Разработаны имитационные модели для исследования режимов генерирования ВГС при использовании двух - и трехобмоточных трансформаторов на ГПП, позволяющие выполнять оценку ПКЭ в ЭТС угольных шахт.
2. Установлены зависимости суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) от параметров электрической сети и мощности ШПУ с учетом применения двух - и трехобмоточных трансформаторов на ГПП.
3. Установлены эмпирические зависимости для оценки суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) на шинах ГПП (6 кВ) от мощности ШПУ ($P_{шпу}$) и ФКУ ($Q_{фку}$), позволяющие оценить эффективность использования ФКУ для ограничения ВГС в ЭТС угольных шахт.
4. Выполненная оценка сходимости результатов имитационного моделирования с экспериментальными исследованиями ПКЭ в ЭТС угольных шахт показала хорошую сходимость результатов не ниже 0,92, что характеризует высокую адекватность разработанных моделей ЭТС угольной шахты.
5. Анализ результатов моделирования суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) от параметров электрической сети и мощности ШПУ при двухобмоточных и трехобмоточных трансформаторах на сходимость показал, что значения K_U лежат в диапазоне от 0,05 до 0,89 %, что позволяет применять для дальнейших исследований эмпирические зависимости для оценки суммарного коэффициента

гармонических составляющих напряжения (K_U) на шинах ГПП (6 кВ) от мощностей ФКУ ($Q_{\text{фку}}$) и ШПУ ($P_{\text{шпу}}$) без учета применения двух - и трехобмоточных трансформаторов.

В шестой главе приведена реализация результатов диссертационного исследования для обеспечения повышения эффективности функционирования электротехнических систем угольных шахт:

1. Методическая поддержка повышения эффективности функционирования электротехнических систем.

Результаты диссертационного исследования приняты к использованию в ИПКОН РАН, АО «Русский уголь», Угольном департаменте АО «Арселормиттал Темиртау» (шахта им. Костенко, шахта Саранская), Угольном департаменте АО «*QARMET*» (шахта им. Кузембаева), в виде:

- методики имитационного моделирования СЭС высокопроизводительных участков угольных шахт для исследования ПКЭ;
- методики имитационного моделирования СЭС угольных шахт высокой производительности;
- рекомендаций по обеспечению качества электроэнергии для повышения эффективности функционирования ЭТС угольных шахт.

2. Аппаратная поддержка мониторинга показателей качества электроэнергии и компенсации влияния высших гармонических составляющих в подземных участковых электрических сетях.

На основе представленных в главе 2 экспериментальных исследований ПКЭ в подземных электрических сетях угольных шахт и обоснования применения КФКУ, приведенного в главе 4, разработано устройство мониторинга ПКЭ и компенсации влияния ВГС в подземных участковых электрических сетях угольных шахт.

Структурная схема устройства приведена на рис. 31.

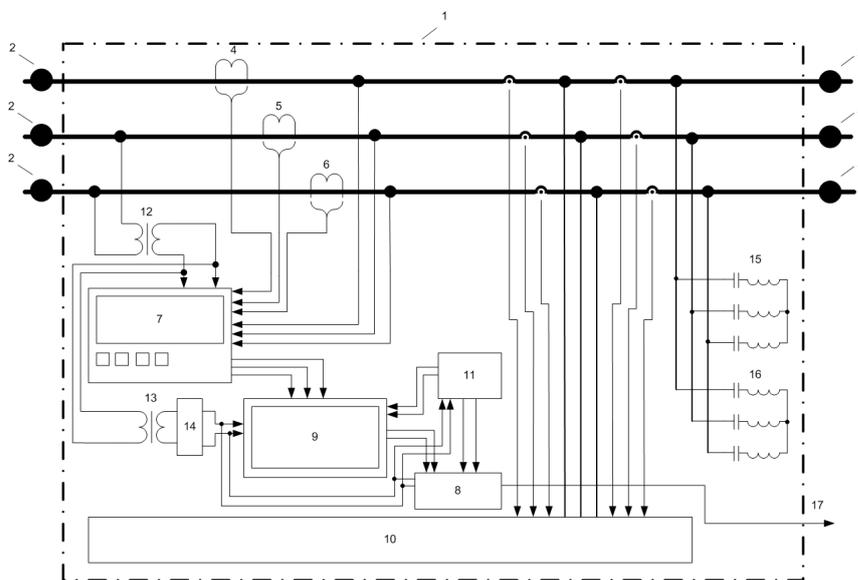


Рисунок 31 - Структурная схема устройства мониторинга ПКЭ и компенсации влияния ВГС в подземных участковых электрических сетях угольных шахт, в том числе опасных по внезапным выбросам газа и пыли

Устройство включает: 1 - взрывозащищенную оболочку; 2 - искробезопасные контакты для подключения к источнику питания; 3 - искробезопасные контакты для подключения к источнику ВГС; 4, 5, 6 - измерительные трансформаторы тока; 7 - анализатор для мониторинга ПКЭ; 8 - медиаконвертер; 9 - запоминающее устройство; 10 - АФВГ; 11 - источник резервного электропитания; 12 - понижающий трансформатор 1,14/0,22 кВ для электропитания анализатора ПКЭ; 13 - понижающий трансформатор 220/5 В для питания запоминающего устройства, медиаконвертера и заряда источника резервного

электропитания; 14 – выпрямитель для электропитания медиаконвертера, запоминающего устройства, а также для заряда источника резервного электропитания; 15 – пассивный фильтр ВГС, настроенный на компенсацию 5 гармоники; 16 - пассивный фильтр ВГС, настроенные на компенсацию 7 гармоники; 17 – оптический выход.

Устройство предусматривает технологию *Ethernet* (10/100 mb/s), которая организована по оптическим линиям связи.

Устройство мониторинга ПКЭ и компенсации влияния ВГС в подземных участковых электрических сетях угольных шахт во взрывозащищенной оболочке 1 подключается между источником питания 2 и электропотребителем 3. При этом от трансформаторов тока 4, 5, 6 на анализатор ПКЭ 7 поступает ток, а также напряжение сети. Питание анализатора ПКЭ 7 осуществляется от понижающего трансформатора 12. С анализатора ПКЭ 7 сигналы управления поступают на запоминающее устройство 9 и медиаконвертер 8, служащий преобразователем сигналов для дальнейшей их передачи по оптическим линиям связи с защищенную сеть *Ethernet*.

Напряжение и ток поступают на КФКУ, состоящее из АФВГ 10 и ПФ ВГС 15 и 16, которые ограничивают уровни ВГС на подземную участковую электрическую сеть. Для питания медиаконвертера 8 и запоминающего устройства 9 предусмотрен понижающий трансформатор 13 с неуправляемым выпрямителем 14, производящий подзарядку аккумуляторных батарей 11, служащих для резервного питания устройства.

В состав комбинированного ФКУ входит АФВГ, состоящий из: входного дросселя; трехфазного моста, выполнен на IGBT; емкостного накопителя; системы управления АФВГ. Принцип действия АФВГ состоит в генерировании компенсирующего тока в противофазе с током, искажающим форму синусоиды. В результате взаимодействия указанных токов происходит улучшение формы синусоиды, путем взаимной компенсации и получения в результате тока синусоидальной формы без недопустимых искажений.

КФКУ подключается между источником напряжения и источником генерирования ВГС. На источнике напряжения снимаются токовые сигналы (i_{as} , i_{bs} , i_{cs}). На источнике генерирования ВГС снимаются токовые сигналы (i_a , i_b , i_c) и напряжения (u_a , u_b , u_c), которые поступают в систему управления АФВГ, где проводится разработка сигналов управления IGBT.

В состав комбинированного ФКУ входят пассивные фильтры ВГС, настроенные на подавление 5 и 7 гармоник.

Устройство мониторинга ПКЭ и компенсации влияния ВГС в подземных участковых электрических сетях угольных шахт, в том числе опасных по внезапным выбросам газа и пыли, предназначено для работы в сетях напряжением 1140 В.

С помощью устройства осуществляется автоматизированный мониторинг ПКЭ и компенсации уровней ВГС в подземных участковых электрических сетях угольных шахт, в том числе опасных по внезапным выбросам газа и пыли.

3. Кадровая поддержка повышения эффективности функционирования электротехнических систем. Результаты исследований внедрены в учебный процесс по направлению: 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» по дисциплинам «Электроснабжение», «Промышленная электроника»; 21.05.04 направление «Горное дело» по дисциплинам: «Электроснабжение горных предприятий», «Промышленная электроника».

Выводы по главе 6.

1. Проработана методическая поддержка обеспечения повышения эффективности функционирования электротехнических систем угольных шахт.
2. Проработана аппаратная поддержка мониторинга показателей качества электроэнергии и компенсации влияния высших гармонических составляющих в подземных участковых электрических сетях.
3. Проработана кадровая поддержка обеспечения повышения эффективности функционирования электротехнических систем.

Заключение

В диссертационной работе дано решение актуальной научно-технической проблемы повышения эффективности функционирования ЭТС угольных шахт на основе методики экспериментального исследования ПКЭ; имитационное моделирование режимов генерирования ВГС; выбора средств повышения ПКЭ; установления зависимостей ПКЭ от параметров ЭТС, мощности преобразовательных устройств систем электропривода, показателей режимов электропотребления, которые определяют закономерности, формирующими ПКЭ, влияющими на эффективность функционирования ЭТС угольных шахт.

Основные результаты работы заключаются в следующем.

1. Проведенные экспериментальные исследования ПКЭ показывают, что в ЭТС угольных шахт суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения (K_U) имеет значения, превышающие требуемое ГОСТ 32144-2013 для электрических сетей 6 кВ, в 1,86 – 2,7 раза.
2. Разработаны имитационные модели для исследования режимов генерирования ВГС преобразовательными устройствами систем электропривода технологических электропотребителей, позволяющие оценивать уровень ПКЭ в ЭТС угольных шахт.
3. Разработана имитационная модель для исследования режимов генерирования ВГС с учетом установки ФКУ в подземных участковых электрических сетях угольных шахт.
4. Выполнено обоснование применения комбинированных ФКУ для повышения ПКЭ в подземных участковых электрических сетях напряжением 1,14 кВ для обеспечения допустимого уровня K_U при линейной итерации, равной 6,1 %.
5. Доказана эффективность функционирования комбинированного ФКУ в ЭТС выемочных участков, заключающаяся в снижении суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения K_U в 1,62 раза, при уровне питающего напряжения с допустимым отклонением ± 10 %.
6. Установлена зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) от мощностей нелинейной нагрузки ($P_{н.н.}$) и пассивного фильтра комбинированного ФКУ ($Q_{фку}$).
7. Разработаны имитационные модели для исследования режимов генерирования ВГС при установке двух- и трехобмоточных трансформаторов на ГПП, позволяющие выполнять оценку ПКЭ в системах электроснабжения поверхностного и подземного комплексов угольных шахт.
8. Установлены зависимости между суммарным коэффициентом гармонических составляющих напряжения (K_U) и параметрами электрической сети, мощности ШПУ при применении двух- и трехобмоточных трансформаторов на ГПП.
9. Установлены эмпирические зависимости суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) на шинах ГПП 6 кВ от мощности ШПУ ($P_{шпу}$) и ФКУ ($Q_{фку}$), позволяющие оценить эффективность применения ФКУ для ограничения ВГС в ЭТС поверхностного комплекса угольных шахт.
10. Выполнен сравнительный анализ сходимости результатов имитационного моделирования режимов генерирования ВГС преобразовательными устройствами систем управления электроприводами технологического оборудования поверхностного и подземного комплексов с результатами экспериментальных исследований, который оценивается уровнем не менее 0,9.
11. На основе экспериментальных исследований ПКЭ в подземных электрических сетях и обоснования применения комбинированного ФКУ, предложена структура устройства мониторинга ПКЭ и компенсации уровня ВГС в подземных участковых электрических сетях угольных шахт, в том числе опасных по внезапным выбросам газа и пыли.

Научные результаты работы отражены в следующих основных публикациях:

Научные статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Решетняк, С.Н. К вопросу о применении частотно-регулируемого привода шахтных подъемных установок / С.Н. Решетняк // ГИАБ. – 2005 г. - №5 – С. 230 – 232.
2. Решетняк, С.Н. Особенности применения высоковольтных преобразователей частоты для питания синхронных двигателей используемых в качестве привода подъемных установок / С.Н. Решетняк // ГИАБ. – 2006 г. - №10 – С. 66 – 71.
3. Решетняк, С.Н. Математическое описание трехмассовой ЭМС подъемной установки / С.Н. Решетняк // ГИАБ. – 2007 г. - №7 – С. 287 – 291.
4. Решетняк, С.Н. Особенности применения преобразовательной техники на горнодобывающих предприятиях России / В.Н. Фащиленко, О.В. Федоров, С.Н. Решетняк // ГИАБ. – 2008 г. - №6 – С. 331 – 334.
5. Решетняк, С.Н. Математическое моделирование трехмассовой ЭМС подъемной установки при параллельной коррекции координат / С.Н. Решетняк // ГИАБ. – 2009 г. - №2 – С. 300 – 304.
6. Решетняк, С.Н. Энергоэффективное операционное управление очистным участком / С.С. Кубрин, С.Н. Решетняк, К.Н. Копылов // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. - 2016 г. - №5 - С. 4 – 10.
7. Решетняк, С.Н. Пути модернизации выемочного комбайна угольной шахты / К.Н. Копылов, С.Н. Решетняк, С.С. Кубрин // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2016 г. - № 4, - т. 12, С. 41 – 47.
8. Решетняк, С.Н., Актуальные аспекты повышения уровня энергоэффективности высокопроизводительных угольных шахт / С.Н. Решетняк, М.Ю. Решетняк // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2017 г. - №3 - С. 21 – 24.
9. Решетняк, С.Н. Анализ методов построения прогнозных моделей электропотребления в условиях высокопроизводительных угольных шахт / С.Н. Решетняк // Электротехнические и информационные комплексы и системы. - 2020 г. - №2 - С. 28 – 35.
10. Решетняк, С.Н. Имитационное моделирование режимов технологического оборудования комплексно-механизированного забоя высокопроизводительной угольной шахты в программе MATLAB / С.С. Кубрин, С.Н. Решетняк // Электротехнические и информационные комплексы и системы. - 2021 г. - №1 - С. 120 – 128.
11. Решетняк, С.Н. Анализ гармонического состава напряжения в подземных электрических сетях высокопроизводительных угольных шахт / А.В. Ляхомский, Л.А. Плащанский, С.Н. Решетняк, М.Ю. Решетняк // Промышленная энергетика. – 2021 г. - № 10. С. 32 – 41.
12. Решетняк, С.Н. Повышение эффективности функционирования поверхностного комплекса угольных шахт / С.Н. Решетняк // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2024 г. - №2 - С. 59 – 65.
13. Решетняк, С.Н. Обоснование обобщенной модели электротехнической системы для исследования влияния высших гармоник в условиях технологического оборудования угольных шахт / С.Н. Решетняк, Е.Н. Перфильева // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2025 г. - №1 - С. 22 – 26.
14. Решетняк, С.Н. Методология исследования режимов генерации высших гармонических составляющих преобразовательными устройствами в системах электропривода технологического оборудования угольных шахт / С.Н. Решетняк // Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления - 2025г. - №1 - С. 5 – 21.
15. Решетняк, С.Н. Современное состояние и перспективы развития рудничных подъёмных установок / С.Н. Решетняк, Р.В. Митькин // Энергобезопасность и энергосбережение - 2025г. - №2 - С. 56 – 60.

Статьи, индексируемые в научной базе данных SCOPUS, GeoRef:

16. Решетняк, С.Н. Автоматизированная информационно-измерительная система технического учета электроэнергии для подземных горных работ / С.С. Кубрин, С.Н. Решетняк // Горный журнал. - 2016 г. - №1. С. 87 – 90.
17. Решетняк, С.Н. Анализ технологических показателей работы выемочного участка шахты «Полысаевская» АО «СУЭК-Кузбасс» / С.С. Кубрин, С.Н. Решетняк, А.М. Бондаренко // - ГИАБ. – 2019 г. - № 3 - С.14 – 21.
18. Решетняк, С.Н. Разработка высоковольтного устройства автоматизированного мониторинга качества электрической энергии в подземных сетях угольных шахт / А.В. Ляхомский, Л.А. Плащанский, С.Н. Решетняк, М.Ю. Решетняк // ГИАБ. – 2019 г. - № 7 - С.207 – 213.
19. Решетняк, С.Н. Пути повышения энергетической эффективности подземных электрических сетей высокопроизводительных угольных шахт/ С.С. Кубрин, А.А. Мосиевский, И.М. Загоршменный, С.Н. Решетняк, Ю.М. Максименко // Уголь. – 2022 г. - №2 С. 4 – 9.
20. Решетняк, С.Н. Повышение качества электрической энергии в подземных электрических сетях высокопроизводительных угольных шахт / Л.А. Плащанский, С.Н. Решетняк, М.Ю. Решетняк // Горные науки и технологии. – 2022 г. -№7 С. 66 – 77.
21. Решетняк, С.Н. Декомпозиционный анализ системы электроснабжения угольных шахт для оценки генерации высших гармоник технологическим оборудованием поверхностного комплекса / С.Н. Решетняк, В.В. Зотов, Д.С. Сучко и др. // Уголь. – 2025 г. -№1 С. 93–99.
22. Решетняк, С.Н. Технико-экономическая оценка влияния высших гармонических составляющих на эффективность функционирования электротехнического комплекса угольной шахты / С.Н. Решетняк, Г.М. Лебедев, Б.П. Хозяинов, Т.М. Черникова // Техника и технология горного дела. – 2025 г. – № 1(28). – С. 4-20.
23. Решетняк, С.Н. Оценка влияния показателей качества электроэнергии на эффективность функционирования электротехнического комплекса угольной шахты / Ляхомский А.В., Решетняк С.Н., Кутепова Е.Н. // ГИАБ. – 2025 г. - № 6 - С. 168-180.
24. *Reshetnyak, S. Analysis of technological performance of the extraction area of the coal mine. III-rd International innovative mining symposium / Reshetnyak S., Bondarenko A. // IIMS 2018 Kemerovo. DOI: 10.1051/e3sconf/20184101014*
25. *Reshetnyak, S. Enhancing performance efficiency of electric consumers within surface infrastructure of coal mines / Reshetnyak S., Zotov V., Kuziev D., Kozlova O. // Eurasian mining 2025 (1) pp. 100 -104.*

Патент на полезную модель:

26. Решетняк, С.Н. Высоковольтное устройство автоматизированного мониторинга качества электрической энергии в подземных сетях угольных шахт / А.В. Ляхомский, Л.А. Плащанский, С.Н. Решетняк, М.Ю. Решетняк // Патент на полезную модель №185421 - бюл. №34 от 04.12.2018 г.

Статьи и тезисы в рецензируемых журналах, научных сборниках и трудах конференций:

27. Решетняк, С.Н. Мониторинг энергоэффективных режимов работы электромеханических систем подземных горных машин / В.Н. Фащиленко, С.Н. Решетняк // Электрика. – 2014 г. - № 10. С. 25 – 28.
28. Решетняк, С.Н. Имитационное моделирование системы электроснабжения выемочного участка угольной шахты / К.Н. Копылов, С.С. Кубрин, С.Н. Решетняк // ГИАБ. – 2016 г. - №12. С. 40 – 50.

29. Решетняк, С.Н. Повышение уровня учета и контроля потребления электроэнергии подземными потребителями шахт и рудников / К.Н. Копылов, С.С. Кубрин, С.Н. Решетняк // ГИАБ. – 2017 г. - №3 - С. 97 – 106.
30. Решетняк, С.Н. Экспериментальные исследования параметров работы очистного комбайна угольной шахты при различных скоростях подачи / К.Н. Копылов, С.С. Кубрин, И.М. Закоршменный, С.Н. Решетняк // ГИАБ. – 2017 г. №12. Отдельный сборник №29 - С. 48 – 56.
31. Решетняк, С.Н. К вопросу повышения энергетической эффективности при отработке высокопроизводительных забоев метанообильных угольных шахт / С.Н. Решетняк // ГИАБ. – 2018 г. – № 48 (специальный выпуск) Том 1. - С. 355 – 364.
32. Решетняк, С.Н. Исследование резонансных явлений в подземных электрических сетях высокопроизводительных угольных шахт. / Л.А. Плащанский, С.Н. Решетняк, М.Ю. Решетняк // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2021 г. - № 2 (64). - С. 13 – 25.
33. Решетняк, С.Н. К вопросу обоснования критериев рационализации систем электроснабжения угольных шахт. / С.Н. Решетняк // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2025 г. – 1 (369) – С. 135 – 140.
34. Решетняк, С.Н. К вопросу повышения энергетических показателей промышленных предприятий / С.Н. Решетняк // Научно-практический журнал «Приволжский научный вестник». - 2013 г. - №10. - С. 41 – 44.
35. Решетняк, С.Н. Мониторинг энергоэффективных режимов оборудования при подземных горных работах / В.Н. Фащиленко, С.Н. Решетняк // Автоматизированный электропривод и автоматика: сборник докладов Всероссийской научно-практической конференции. 1-4 июля 2014 г. – Липецк: Изд-во Липецкого государственного технического университета, 2014 г. – С. 26 – 28.
36. Решетняк, С.Н. Мониторинг горного оборудования на основе анализа баланса энергопотребления в коммутационной аппаратуре электросети горного предприятия / С.С. Кубрин, С.В. Ясученя, В.В. Зотов, С.Н. Решетняк // Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр. Под редакцией академика К.Н. Трубецкого. – М.: ИПКОН РАН. – 2014 г. С. 233 – 237.
37. Reshetnyak, S.N. Improving the energy performance of industrial enterprises / Fashilenko V.N., Reshetnyak S.N. // Miner's week – 2015 Reports of the XXIII international scientific. 2015. P. 570 – 573.
38. Reshetnyak, S.N. Energy efficient resonant mode of electromechanical system mining machines based on management structures with PID-controller / Fashilenko V.N., Reshetnyak S.N. // Miner's week – 2015 Reports of the XXIII international scientific. 2015. P. 608 – 612.
39. Решетняк, С.Н. Автоматизированная система контроля энергоэффективных режимов работы электроприводов подземных горных машин. / М.Ю. Василенко, А.А. Кузнецова, С.Н. Решетняк // Двадцать вторая Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА: Тез. докл. В 3 т. Т. 2. М.: Издательский дом МЭИ, 2016 г. С. 100.
40. Решетняк, С.Н. Актуальность повышения уровня энергоэффективности и безопасности очистного участка угольной шахты / С.Н. Решетняк // 2-я Международная научная школа академика К.Н. Трубецкого «Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр». – М.: ИПКОН РАН. 2016 г. С. 232 – 236.
41. Решетняк, С.Н. Актуальность исследования параметров качества электрической энергии в подземных сетях угольных шахт / К.Н. Копылов, Л.А. Плащанский, С.Н. Решетняк, М.Ю. Решетняк, С.С. Кубрин // Международная научная школа молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке – глазами молодых». – М.: ИПКОН РАН. 2016 г С. 129 - 134.
42. Решетняк, С.Н. Актуальные аспекты повышения энергоэффективности оборудования выемочного участка угольной шахты / К.Н. Копылов, С.Н. Решетняк, С.С. Кубрин // Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий:

сборник научных трудов III Международной (VI Всероссийской) научно-технической конференции. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2017 г. С. 529 – 533.

43. Решетняк, С.Н. Оценка геотехнологических рисков освоения недр при ведении подземных горных работ / С.С. Кубрин, С.Н. Решетняк, А.М. Бондаренко // Сборник материалов XVI Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций» 27-28 сентября 2017 год. М.: ФКУ Центр «Антистихия» МЧС России. 2017 г. С. 63 – 65.

44. Решетняк, С.Н. Задачи повышения уровня нормирования электропотребления угольных шахт высокой производительности / С.С. Кубрин, С.Н. Решетняк, А.М. Бондаренко // Повышение надежности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов: межвузовский сборник научных трудов (с международным участием). – Уфа: Изд-во Энергодиагностика, 2018 г. С. 269 – 272.

45. Решетняк, С.Н. Анализ влияния факторного пространства на параметры удельных норм электропотребления, выемочных участков угольных шахт высокой производительности / С.С. Кубрин, С.Н. Решетняк, А.М. Бондаренко // Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий: сборник научных трудов IV Международ. научно-технической конф. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2019 г. С. 151 – 158.

46. Решетняк, С.Н. Исследование работы электропривода горных машин в энергоэффективных режимах / В.Н. Фащиленко, С.Н. Решетняк // Сборник научных статей III Международного конгресса «Энергетическая безопасность». Юго-Западный государственный университет (Курск). 2020 г. С. 133 – 139.

47. Решетняк, С.Н. Ограничение влияния высших гармоник в системе электроснабжения угольных шахт высокой производительности / Л.А. Плащанский, С.Н. Решетняк, М.Ю. Решетняк // Сборник трудов III всероссийской научно-практической конф. «Энергетика будущего - цифровая трансформация». Липецк, 2022 г. С. 97 – 101.

48. Решетняк, С.Н. Особенности построения нейронной сети системы электроснабжения высокопроизводительного выемочного участка угольной шахты / С.Н. Решетняк // 4 конференция международной научной школы академика К.Н. Трубецкого "Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр". 2020 г. – М.: ИПКОН РАН 2020, С. 435 – 439.

49. Решетняк, С.Н. Энергоресурсосберегающий электропривод шахтной подъемной установки / Р.В. Митькин, С.Н. Решетняк // Международная научно-техническая конференция «Технологический суверенитет и цифровая трансформация». Казанский государственный энергетический университет. Казань, 2024 г. С. 148 – 152.

50. Решетняк, С.Н. К вопросу повышения показателей качества электроэнергии в электротехнических системах угольных шахт / С.Н. Решетняк, Е.В. Голубов // Символ науки – 2025 г. №5-1 – С. 59 – 65.