

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»

диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук

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

Москва 2025 год

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Введение	8
Глава 1. Анализ эффективности функционирования электротехнических систем угольных шахт. Обоснование и постановка задач исследования	16
1.1 Общая характеристика проблемы	16
1.2 Анализ исследований повышения показателей качества электрической энергии промышленных предприятий	19
1.3 Источники высших гармонических составляющих и средства повышения качества электроэнергии	24
1.3.1 Источники высших гармонических составляющих	24
1.3.2 Средства повышения качества электрической энергии	30
1.4 Обоснование и постановка задач диссертационного исследования	35
Глава 2. Экспериментальное исследование показателей качества электроэнергии в системах электроснабжения угольных шахт	36
2.1 Общая характеристика экспериментального исследования	36
2.2 Методика экспериментального исследования показателей качества электроэнергии в системах электроснабжения угольных шахт	39
2.3 Экспериментальное исследование показателей качества электроэнергии в электрических сетях поверхностного комплекса	44
2.4 Экспериментальное исследование показателей качества электроэнергии в подземных участковых электрических сетях 6 кВ	54
2.5 Выводы	63
Глава 3. Исследование режимов генерирования высших гармонических составляющих преобразовательными устройствами систем управления электроприводами технологического оборудования угольных шахт	65

3.1 Исходные положения	65
3.2 Технологические электропотребители как источники высших гармонических составляющих поверхностного и подземного комплексов угольных шахт	66
3.2.1 Технологические электропотребители поверхностного комплекса как источники высших гармонических составляющих	66
3.2.2 Технологические электропотребители выемочных и проходческих участков как источники высших гармонических составляющих подземного комплекса	70
3.3 Методика имитационного моделирования режимов генерирования высших гармонических составляющих в электротехнических системах угольных шахт	76
3.4 Исследование режимов генерирования высших гармонических составляющих преобразовательными устройствами систем управления электроприводами технологического оборудования угольных шахт	79
3.4.1 Исследование режимов генерирования высших гармонических составляющих электроприводами с системой «Управляемый выпрямитель – двигатель постоянного тока»	79
3.4.2 Исследование режимов генерирования высших гармонических составляющих электроприводами с системой «Преобразователь частоты – асинхронный двигатель»	88
3.5 Выводы	98
Глава 4. Исследование режимов генерирования высших гармонических составляющих в подземных участковых электротехнических системах угольных шахт с обоснованием параметров и применением фильтрокомпенсирующих устройств	99

4.1 Электротехнические системы выемочных и проходческих участков для исследования режимов генерирования высших гармонических составляющих	99
4.1.1 Электротехнические системы выемочных участков для исследования режимов генерирования высших гармонических составляющих	99
4.1.2 Электротехнические системы проходческих участков для исследования режимов генерирования высших гармонических составляющих	104
4.2 Исследование режимов генерирования высших гармонических составляющих в подземных участковых электротехнических системах	108
4.2.1 Исследование режимов генерирования высших гармонических составляющих в электрических сетях выемочного участка	108
4.2.2 Исследование режимов генерирования высших гармонических составляющих в электрических сетях проходческого участка	124
4.3 Методика выбора средств повышения показателей качества электроэнергии в подземных участковых электротехнических системах	132
4.4 Обоснование параметров и применения комбинированных фильтрокомпенсирующих устройств для повышения показателей качества электроэнергии в подземных электрических сетях	136
4.5 Исследование режимов генерирования высших гармонических составляющих в подземных участковых электротехнических системах с применением комбинированных фильтрокомпенсирующих устройств	152
4.6 Выводы	164
Глава 5. Исследование режимов генерирования высших гармонических составляющих в электрических сетях угольных	166

шахт для обоснования параметров и применения фильтрокомпенсирующих устройств	
5.1 Имитационные модели электротехнических систем угольных шахт для исследования режимов генерирования высших гармонических составляющих	166
5.2 Исследование режимов генерирования высших гармонических составляющих в электротехнических системах поверхностного комплекса угольных шахт	180
5.2.1 Исследование режимов генерирования высших гармонических составляющих в электротехнических системах поверхностного комплекса угольных шахт с двухобмоточными трансформаторами на главной понизительной подстанции	180
5.2.2 Исследование режимов генерирования высших гармонических составляющих в электротехнических системах поверхностного комплекса угольных шахт с трехобмоточными трансформаторами на главной понизительной подстанции	198
5.3 Исследование режимов ограничения высших гармонических составляющих в электротехнических системах поверхностного комплекса угольных шахт	206
5.3.1 Исследование режимов ограничения высших гармонических составляющих в электротехнических системах поверхностного комплекса угольных шахт с двухобмоточными трансформаторами на главной понизительной подстанции	206
5.3.2 Исследование режимов ограничения влияния высших гармонических составляющих в электротехнических системах поверхностного комплекса угольных шахт с трехобмоточными трансформаторами на главной понизительной подстанции путем применения фильтрокомпенсирующих устройств	215

5.4 Выводы	225
Глава 6. Реализация научно-технических решений для обеспечения повышения эффективности функционирования электротехнических систем угольных шахт	226
6.1 Методическая поддержка обеспечения повышения эффективности функционирования электротехнических систем угольных шахт	226
6.2 Аппаратная поддержка мониторинга показателей качества электроэнергии и компенсации влияния высших гармонических составляющих в подземных участковых электрических сетях	229
6.3 Кадровая поддержка обеспечения повышения эффективности функционирования электротехнических систем	233
6.5 Выводы	234
Заключение	235
Литература	237
Перечень сокращений	268
Приложения	270
Приложение 1. Данные экспериментальных исследований показателей качества электроэнергии на шинах 6 кВ понизительных подстанций угольных шахт	271
Приложение 2. Данные экспериментальных исследований показателей качества электроэнергии в подземных сетях угольных шахт	273
Приложение 3. Данные экспериментальных исследований электротехнических параметров подземного технологического оборудования угольной шахты	275
Приложение 4. Характеристика основного технологического оборудования выемочных и проходческих участков угольных шахт	284

Приложения 5. Характеристика кабельной продукции подземных электрических сетей	290
Приложение 6. Характеристика понизительных подстанций энергопоездов подземных электрических сетей	291
Приложение 7. Осциллограммы напряжения и тока в имитационной модели ЭТС угольной шахты	292
Приложение 8. Результаты внедрения	302

Введение

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.

Расширяющееся 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.

Глава 1. Анализ эффективности функционирования электротехнических систем угольных шахт. Обоснование и постановка задач исследования

1.1 Общая характеристика проблемы

Эффективность функционирования ЭТС промышленных предприятий в значительной степени обусловлена качеством электроэнергии. Современные ЭТС промышленных предприятий имеют в своем составе системы управления электроприводами, включающими управляемые полупроводниковые преобразователи, которые вносят в питающую сеть искажения при генерировании ВГС напряжения и тока. Это приводит к: нарушению номинальных режимов работы технологического оборудования, снижая его производительность; ложным срабатываниям защит; сокращению сроков службы электрооборудования и кабельных линии за счет ускоренного старения изоляции и возрастания числа аварийных простоев технологического оборудования.

Развитие ЭТС промышленных предприятий приводит к расширению применения полупроводниковых преобразовательных устройств (преобразователей частоты и управляемых выпрямителей) и связанным с этим возрастанием уровня генерирования ВГС.

Основными направлениями по повышению эффективности функционирования ЭТС промышленных предприятий, в том числе угольных шахт, являются: повышение уровня питающей напряжения; управление уровнем генерирования ВГС для обеспечения нормативных значений ПКЭ; развитие аналитического описания режимов генерирования ВГС, включая установление зависимостей суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения и тока от электротехнических показателей электроприемников; повышение показателей качества электроэнергии путем структурного и параметрического синтеза ЭТС с комбинированными ФКУ и др. [6, 7, 8, 12 – 16, 18, 21, 31, 44, 54 – 65, 67 – 76, 84, 100, 105 - 107, 113, 116,

118 – 120, 123, 131, 133, 134, 158, 148, 156, 162 – 172, 175 – 177, 181, 182, 186 – 189, 198, 199, 201, 202, 209, 214, 215, 217, 237 – 241, 244, 250, 265, 266, 269 – 272, 276, 277].

Наличие повышенного уровня ВГС влияет на устойчивость системы электроснабжения, что требует приведения показателей качества электроэнергии к требуемым ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» значениям.

Актуальность снижения уровня ВГС в условиях угольных шахт имеет специфические особенности, к числу которых относятся:

- ведение основных и вспомогательных производственных процессов в стесненных подземных условиях с присутствием в атмосфере метана;
- наличие стационарных и передвижных потребителей электроэнергии;
- применение электрооборудования в нормальном, рудничном нормальном, рудничном повышенной надежности, взрывобезопасном и особо взрывобезопасном исполнении;
- наличие защиты, отключающей электрические сети при опасном превышении концентрации метана;
- применение бронированных и гибких экранированных кабелей только с медными жилами;
- наличие значительной доли нелинейной нагрузки в подземных электрических сетях.

Доля нелинейной нагрузки в ЭТС угольных шахт при наличии в системах управления электроприводами преобразовательных устройств имеют тенденцию к росту [26 – 28, 133, 134, 162, 168].

Проблеме повышения качества электрической энергии посвящено значительное число исследований [18, 21, 29, 44, 47, 51 - 58, 67 - 76, 81, 83 - 86, 91, 124 - 126, 128, 149, 176 - 178, 209, 211, 212, 218, 227 - 231, 237 - 245, 249, 251, 270]. При этом исследований режимов генерирования ВГС в условиях

угольных шахт с целью снижения их негативного влияния на эффективность функционирования ЭТС проведено недостаточно.

В исследованиях ПКЭ в условиях угольных шахт практически не рассматривались вопросы, касающиеся:

- установления зависимостей 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 учетом 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 показателей качества электроэнергии на эффективность функционирования ЭТС угольных шахт.

1.2 Анализ исследований повышения показателей качества электрической энергии промышленных предприятий

Исследованию вопросов повышения качества электроэнергии в электрических сетях посвящены работы ученых: Абрамовича Б.Н. [2, 215, 250], Бабокина Г.И. [8, 9, 271], Боярской Н.П. [21], Гамазина С.И. [31], Герман-Галкина С.Г. [33, 34], Дмитриева Б.Ф. [51 - 53], Добрусина Л.А. [54 - 56], Довгун В.П. [21], Ершова М.С. [59 - 62], Ефимова А.А. [63 - 66], Жежеленко И.В. [67 - 72, 99, 156], Железко Ю.С. [73 - 76], Зацепиной В.И. [272, 276, 277], Ляхомского А.В. [131, 133, 134, 162], Немцева Г.А. [148], Пивняка Г.Г. [156 - 158], Плащанского Л.А. [16, 105, 106, 133, 134, 161 - 172, 266], Пронина М.В. [175 - 177], Розанова Ю.К. [104], Сычева Ю.А. [2, 214, 215, 250], Чивенкова А.И. [227 - 230], Шевырева Ю.В. [1, 3, 8, 173, 237 - 241, 271], Шидловского А.К. [242], Шпигановича А.Н. [244, 272], Шрейнера Р.Т. [245], Янченко С.А. [248] и других. Исследованием уровня высших гармоник в условиях промышленных предприятий занимался ряд зарубежных ученых: *Litran S.P.*, *Salmeron P.*, *Prieto J. Alejandro Perez*, *Ning Wang*, *Zongguo Wena*, *Mingqi Liu*, *Jie Guo* [252, 255, 256, 257, 260, 274, 275, 276] и другие.

В вышеприведенных исследованиях рассматривались вопросы: электромагнитной совместимости электроприемников с нелинейной нагрузкой с питающей электрической сетью; снижения влияния ВГС на электрические сети; создания математического аппарата для исследования показателей качества электрической энергии; особенностей применения ФКУ в условиях промышленных предприятий; разработки ФКУ, обеспечивающих снижение ПКЭ до требуемых уровней и др.

В диссертационной работе д.т.н. Сычева Ю.А. «Фильтрокомпенсирующие устройства с активными преобразователями для повышения качества электроэнергии в электротехнических комплексах нефтегазовых предприятий» [215] решена актуальная научно-техническая

проблема повышения качества электроэнергии в централизованных, автономных и комбинированных системах электроснабжения нефтегазового производства путем структурного и параметрического синтеза электротехнических комплексов с фильтрокомпенсирующими устройствами с активными преобразователями. В результате проведенных исследований: выявлены закономерности изменения показателей качества электроэнергии и степени их коррекции активными преобразователями последовательного и параллельного типа; модифицированы методы управления ПКЭ при вариации параметров источника, нагрузки и активных преобразователей. Это позволило в заданных условиях проводить обоснованный выбор типа активного преобразователя, способа управления им, степени коррекции показателей качества электрической энергии. Вместе с этим сформулированы научно-методические основы выбора и обоснования структуры, компонентного состава, режима работы, методов управления и распределения по электрической сети фильтрокомпенсирующих устройств с активными преобразователями в централизованных, автономных и комбинированных системах электроснабжения нефтегазового производства, что явилось развитием теории структурного и параметрического синтеза фильтрокомпенсирующих устройств с активными преобразователями [2, 215, 216, 251].

В диссертационной работе д.т.н. Шевырева Ю.В. «Обоснование и повышение энергетических показателей регулируемых электроприводов буровых установок» [238] решена актуальная научно-техническая проблема обоснования способов повышения энергетических показателей регулируемых электроприводов буровых установок, обеспечивающих нормативные значения ПКЭ [238]. В результате проведенных исследований: разработаны математические модели установившихся, переходных электромагнитных и электромеханических процессов в системах управления электроприводами с вентильными преобразователями, позволяющие устанавливать зависимости влияния ФКУ на энергетические показатели буровых установок; обоснованы

способы повышения энергетических показателей регулируемых электроприводов буровых установок при применении ФКУ со ступенчатым регулированием реактивной мощности и "интегральной" фильтрацией высших гармоник в статических и динамических режимах с косвенной компенсацией реактивной мощности.

В диссертационной работе д.т.н. Пронина М.В. «Создание систем с электрическими машинами и полупроводниковыми преобразователями на основе комплекса быстродействующих уточненных моделей» [175] решена актуальная научно-техническая проблема по разработке методологии моделирования систем с электрическими машинами и полупроводниковыми преобразователями, которая позволила создавать быстродействующие уточненные модели для анализа и синтеза указанных систем средствами моделирования с использованием их при наладке систем [175 -177].

В диссертационной работе д.т.н. Варфоломеева Г.Н. «Методы и средства преобразования числа фаз для улучшения электромагнитной совместимости в электрических системах» решена актуальная научно-техническая проблема развития теоретических основ преобразования числа фаз и разработаны технические средства, обеспечивающие улучшение показателей электромагнитной совместимости в электрических системах [29]. В результате проведенных исследований разработаны принципы и теория преобразования числа фаз на основе метода преобразования координат и обобщенного вектора для трансформаторного способа преобразования.

В диссертационной работе д.т.н. Ефимова А.А. «Активные преобразователи в регулируемых электроприводах переменного тока: теория, математическое моделирование, управление» [63] решена актуальная научно-техническая проблема повышения энергетической эффективности полупроводниковых преобразователей частоты и электроприводов переменного тока на их основе, обладающих улучшенной электромагнитной и энергетической совместимостью с питающей сетью и содержащих различные

типы электродвигателей: синхронно - гистерезисные (СГД), асинхронные (АД) и вентильно-индукторные (ВИД) [63 - 66].

В диссертационной работе д.т.н. Степанова С.Ф. «Повышение эффективности локальных систем электроснабжения» решена актуальная научно-техническая проблема, связанная с разработкой нового поколения автономных электрогенерирующих станций для локальных систем электроснабжения, обеспечивающих высокое качество генерируемой электроэнергии и имеющих существенное значение для перевооружения и реконструкции существующих локальных систем электроснабжения [213]. Разработан принцип многоуровневой компенсации ВГС в кривой выходного напряжения многомостовых схем инверторов тока и напряжения с бестрансформаторным суммированием мощности на конденсаторных, индуктивных и комбинированных фазосдвигающих блоках. Проведенное компьютерное моделирование систем генерирования, преобразования и распределения электроэнергии позволило выявить основные закономерности протекания электромагнитных процессов в нормальных, аварийных и переходных режимах работы [213].

В диссертационной работе д.т.н. Дмитриева Б.Ф. «Автономные системы электропитания с многоуровневыми выпрямителями и широтно-импульсным регулированием» [51] решена актуальная научно-техническая проблема, связанная с исследованием частотных свойств электромагнитных процессов в ступенчатых преобразователях [51 - 53]. Развита теория анализа статических и энергетических характеристик многоуровневых преобразователей в составе автономных систем электропитания с заданными ПКЭ.

В диссертационной работе д.т.н. Добрусина Л.А. «Основы теории и проектирования оптимальных фильтрокомпенсирующих устройств для преобразователей» [54] решена актуальная научно-техническая проблема, связанная с разработкой основ теории и принципов проектирования оптимальных ФКУ, предназначенных для компенсации воздействия

полупроводниковых преобразователей электроэнергии на питающую сеть с минимизацией потерь электроэнергии [54 - 56].

Анализ исследований генерирования ВГС в условиях предприятий с подземной добычей полезного ископаемого показывает, что оценка ПКЭ выполнялась, в основном, для ЭТС поверхностного комплекса [1, 270]. В исследованиях [1] выполнена оценка влияния генерирования ВГС преобразовательными устройствами систем управления электроприводом современных шахтных подъемных установок (ШПУ) с 12-ти пульсными выпрямителями. В шахтных подъемных установках в настоящее время широко применяются системы управления электроприводами с 6-ти пульсными преобразователями.

Вместе с этим проводились исследования по моделированию режимов генерирования ВГС технологическими электропотребителями выемочных участков угольных шахт, однако в этих исследованиях отсутствуют экспериментальные исследования ПКЭ в подземных электрических сетях с оценкой адекватности имитационных моделей ЭТС на основе сравнения результатов имитационного моделирования и экспериментальных исследований в условиях угольных шахт и [8, 271].

В работе [209] решена научная задача по повышению качества электроэнергии в промышленных системах электроснабжения с нелинейной нагрузкой и конденсаторными установками компенсации реактивной мощности в резонансных режимах. Выполнено математическое описание и имитационное моделирование режимов работы ЭТС обогатительной фабрики с рекомендациями по устранению условий для возникновения резонансных режимов [209].

1.3 Источники высших гармонических составляющих и средства повышения показателей качества электроэнергии

1.3.1 Источники высших гармонических составляющих

На основании анализа ЭТЭС угольных шахт Кузнецкого, Донецкого, Воркутинского и Карагандинского угольных бассейнов выполнена классификация электропотребителей по виду электрической нагрузки (табл.1.1). Данные табл. 1.1 показывают: основными источниками генерирования ВГС в поверхностном комплексе являются ШПУ, доля которых в балансе мощности шахты составляет 20 %, а в балансе мощности поверхностного комплекса – 44 %; основными источниками генерирования ВГС в подземных выработках являются технологические электропотребители выемочных и проходческих участков, доля которых в балансе мощности шахты составляет соответственно 7,4 и 1,2 %, а в балансе мощности подземного комплекса суммарно 15,6 %.

На рис. 1.1 приведена диаграмма баланса мощности угольных шахт по видам нагрузки, которая показывает, что доля линейной нагрузки составляет 71,4 %, а доля нелинейной – 28,6 %.

Диаграмма баланса мощности угольных шахт по видам работ, приведенная на рис. 1.2, показывает: подъем горной массы на поверхность - 20 %; проветривание горных выработок 20 %; работа вспомогательных электроприемников поверхностного комплекса 5 %; добыча угля 20 %; конвейерная транспортировка горной массы 20 %; водоотведение 10 %; проходческие (подготовительные) работы 5 %.

В системах электроприводов ШПУ широко применяются двигатели постоянного тока с питанием от управляемых выпрямителей [1, 26, 27, 32, 45, 46, 92, 135, 138, 145, 147, 190, 191, 194 - 197, 200, 202, 207, 220]. Использование машин постоянного тока в качестве электропривода ШПУ обусловлено определенными достоинствами, характерными как для электродвигателей, так и для систем регулирования их скорости.

Таблица 1.1 – Классификация электропотребителей угольных шахт по виду электрической нагрузки

Классификационные признаки				
Комплекс	Виды работ. Участки	Электропотребители	Вид электрической нагрузки	Доля в балансе мощности шахты, %
Поверхностный	Подъем горной массы на поверхность Участки шахтного подъема	Шахтные подъемные машины	Нелинейный	20
	Проветривание горных выработок Участки вентиляции	Главные вентиляторы	Линейный	20
	Вспомогательные электропотребители поверхностного комплекса	АБК, РМЦ и др.	Линейный	5
Подземный	Добычные работы Выемочные участки	Выемочные комбайны	Нелинейный	7,4
		Забойные конвейеры		
		Перегрузжатели		
		Дробилки	Линейный	
		Маслостанции крепи		
	Станции орошения			
	Подготовительные работы Проходческие участки	Проходческие комбайны	Нелинейный	1,2
		Вентиляторы местного проветривания	Линейный	3,8
		Перегрузжатели		
		Станции орошения		
Ленточные конвейеры				
Водоотведение Участки водоотлива	Насосные установки	Линейный	10	
Транспортировка горной массы (Участок конвейерного транспорта)	Магистральные конвейерные установки	Линейный	20	

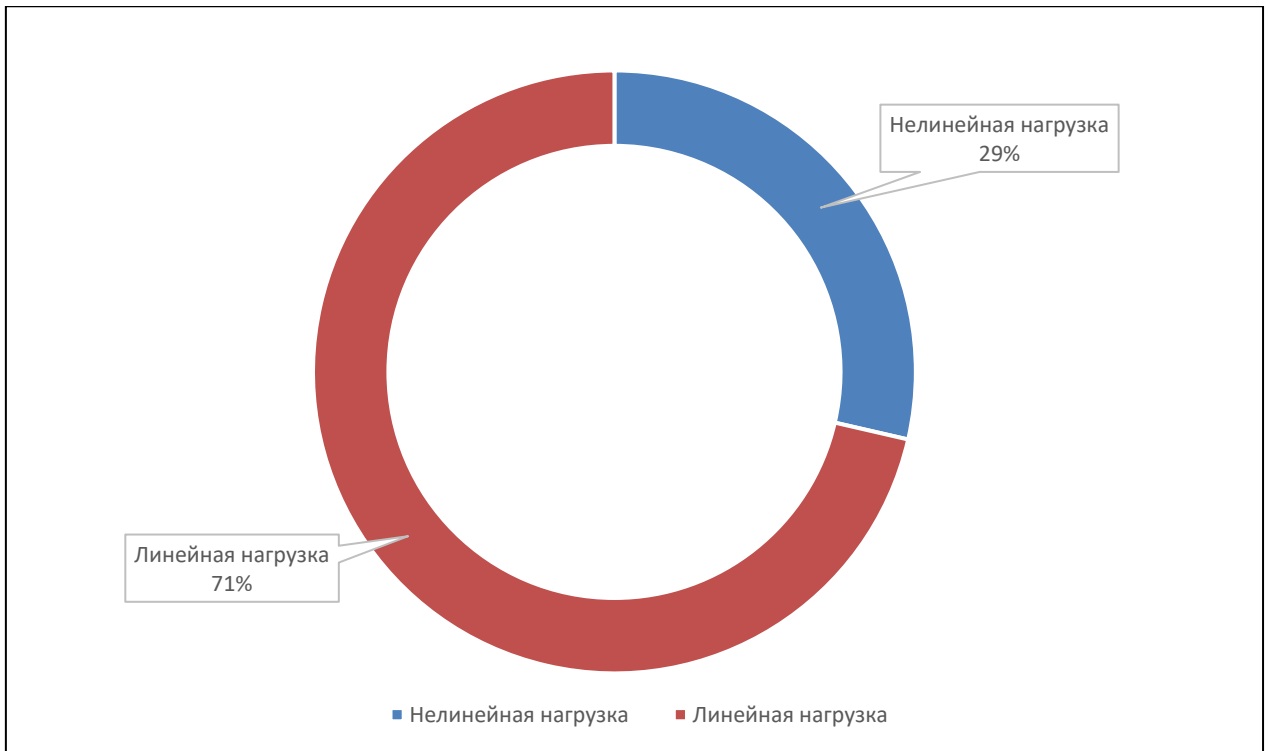


Рисунок 1.1 – Баланс мощности угольных шахт по видам нагрузки

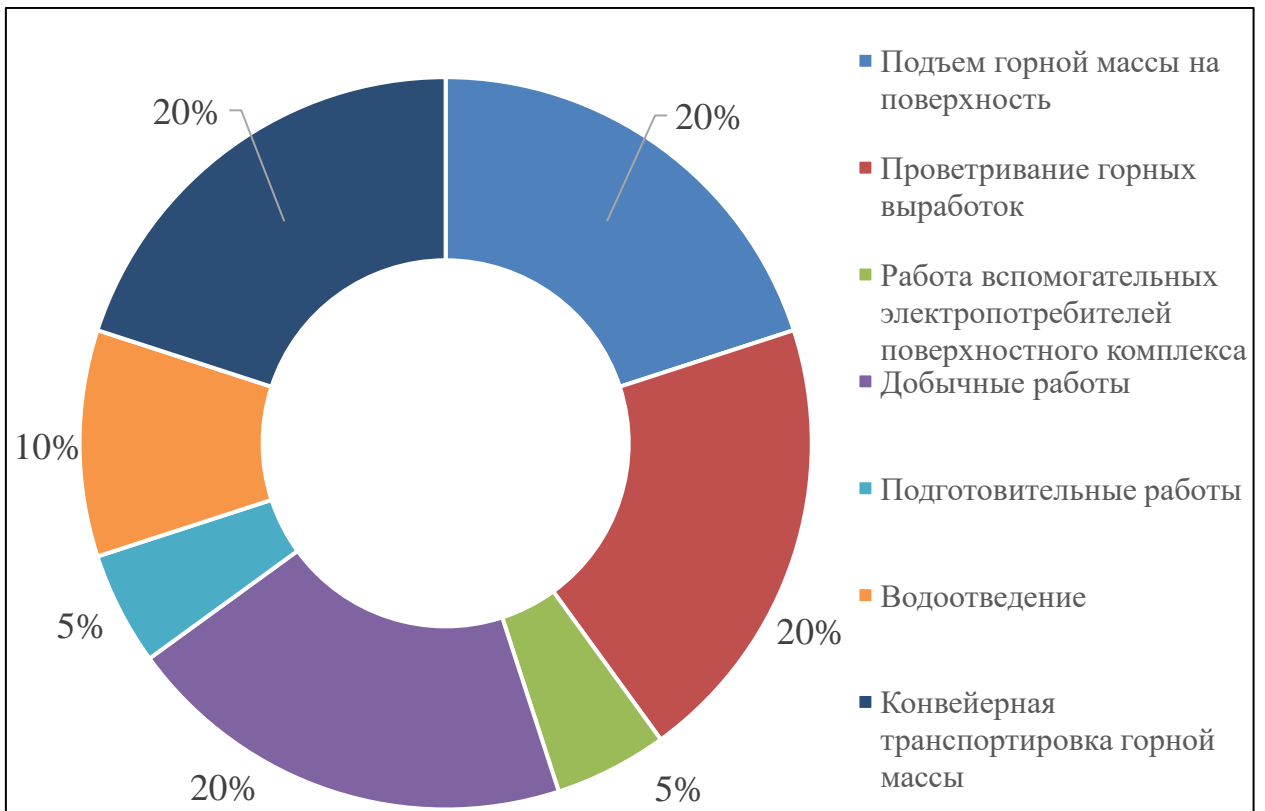


Рисунок 1.2 – Баланс мощности угольных шахт по видам работ

Система «Управляемый выпрямитель – Двигатель постоянного тока» (УВ-ДПТ) по сравнению с системами управления «Преобразователь частоты – Асинхронный двигатель» имеет следующие достоинства: использование простых и экономичных преобразователей энергии - управляемых выпрямителей; использование ДПТ специального исполнения для работы с тиристорными преобразователями; высокие эксплуатационные качества управляемых выпрямителей – гибкость настройки, простота наладки, надежность в работе; высокая степень унификации управляемых выпрямителей; возможность формирования рациональной диаграммы скорости подъемной установки, обеспечивающей максимальную производительность при условии ограничения уровня динамических нагрузок в элементах электромеханической системы; высокая точность управления и степень быстродействия электромеханической системы [45, 46, 92, 147, 196, 197, 200, 207].

К недостаткам относятся: невысокий коэффициент мощности, составляющий для скиповых подъемных установок порядка 0,6 – 0,65, для многогоризонтных клетевых подъемных установок не более 0,35. В этом случае для улучшения коэффициента мощности применяется специальное дополнительное оборудование, ограничивающее влияние «толчков» реактивной энергии, возникающих при пуске ШПУ на питающую сеть, и связанного с этим снижения напряжения в питающей сети.

Несмотря на приведенные недостатки, в настоящее время наиболее распространенными являются ШПУ с системой электропривода УВ-ДПТ [45, 46, 92, 147, 196, 197, 200, 207].

В подземных выработках потребители питаются электроэнергией напряжением: 6, 3,3, 1,14, 0,66, 0,22 кВ. Напряжение 6 кВ используется для питания центральной подземной подстанции (ЦПП), а также для последующего распределения электрической энергии по участковым трансформаторным подстанциям. Дальнейшее трансформирование электрической энергии осуществляется за счет преобразования напряжения 6

кВ в напряжение 3,3, 1,14, 0,66 кВ, которое обеспечивает питание электроприемников подземного технологического оборудования [117, 160, 179, 246]. Напряжение 0,22 кВ, трансформирующиеся в специальном оборудовании АОШ (аппарат осветительный шахтный), в состав которого входит понижающий трансформатор 1,14/0,22 кВ, используется для осветительных сетей.

Электроснабжение участков, расположенных в подземных горных выработках, осуществляется от ЦПП (центральной подземной подстанции) по кабельным линиям напряжением 6 кВ. В участковых электрических сетях для питания электроприемников современных высокопроизводительных очистных комплексов применяется напряжение 3,3 кВ, для других технологических электроприемников 1,14 кВ [12 - 16].

Источники ВГС в ЭТС угольных шахт приведены на рис.1.3.

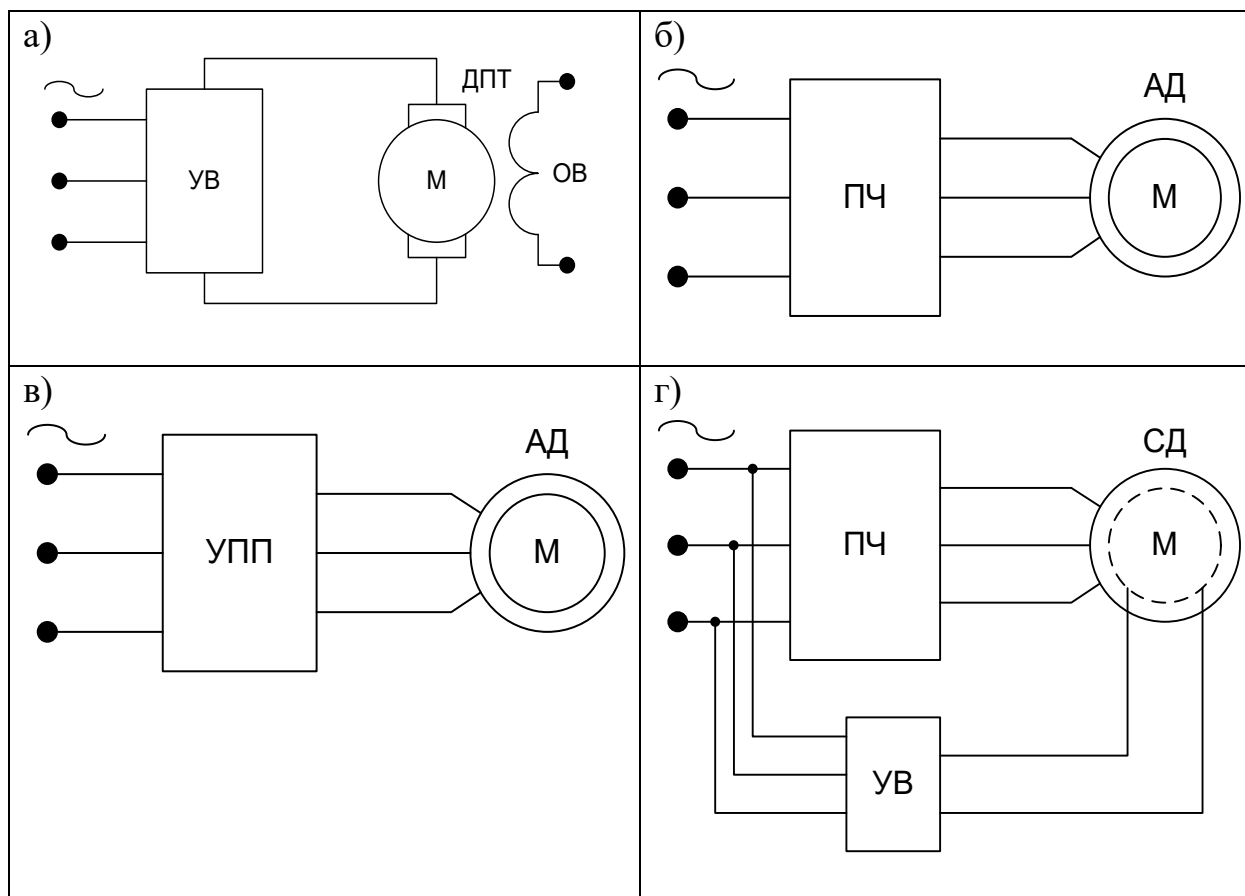


Рисунок 1.3 - Источники ВГС: а) система УВ-ДПТ; б) система ПЧ-АД; в) система УПП-АД; г) система ПЧ-СД

На рис. 1.3а приведена система «Управляемый выпрямитель – двигатель постоянного тока» (УВ-ДПТ), которая применяется в ШПУ, а также в выемочных комбайнах. На рис. 1.3б приведена система «Преобразователь частоты – асинхронный двигатель» (ПЧ-АД), которая применяется в электроприводах перемещения выемочных и проходческих комбайнов, забойных конвейеров и перегружателей. На рис. 1.3в приведена система «Устройство плавного пуска – асинхронный двигатель» (УПП-АД), которая применяется в электроприводах забойных конвейеров. На рис. 1.3г приведена система «Преобразователь частоты – синхронный двигатель» (ПЧ-СД), которая применяется в ШПУ большой мощности. В системах управления электроприводами ПЧ-АД, ПЧ-СД, УПП-АД и УВ-ДПТ используются преобразовательные и выпрямительные устройства, которые являются источниками ВГС [6 - 8, 12 – 16, 18, 21, 31, 44, 54 – 65, 67 – 76, 84, 100, 105 - 107, 113, 116, 118 – 120, 123, 182, 186 – 189, 198, 199, 201, 209, 214, 244, 250, 265, 266].

1.3.2 Средства повышения качества электрической энергии

Фильтрокомпенсирующие устройства для повышения показателей качества электроэнергии классифицируются: по управлению - пассивные фильтры (ПФ), активные фильтры (АФВГ) комбинированные (гибридные) фильтры; по количеству фаз - однофазные, трехфазные (трехпроводные), трехфазные (четырепроводные) [21, 44, 173, 182, 214, 240].

Трехфазные пассивные фильтры (ПФ) ВГС приведены на рис. 1.4.

На рис. 1.4а приведен ПФ, состоящий из трех индуктивностей, последовательно соединенных с конденсаторами подключенных к каждой фазе по схеме соединения «Звезда».

На рис. 1.4б приведен ПФ, состоящий из трех активных сопротивлений, последовательно соединенных с конденсаторами подключенных к каждой фазе по схеме соединения «Звезда».

На рис. 1.4в приведен ПФ, состоящий из трех активных сопротивлений, индуктивностей, конденсаторов, подключенных к каждой фазе по схеме соединения «Звезда».

На рис. 1.4г приведен ПФ, состоящий из трех активных сопротивлений последовательно соединенных с тремя параллельно соединенных индуктивностей и конденсаторов образуя колебательный LC контур и подключенных к каждой фазе по схеме соединения «Звезда».

На рис. 1.4д приведен ПФ, состоящий из трех индуктивностей и конденсаторов. Индуктивности подсоединены последовательно к трем фазам треугольника емкостей.

На рис. 1.4е приведен ПФ, состоящий из трех активных сопротивлений и конденсаторов. Активные сопротивления подсоединены последовательно к трем фазам треугольника емкостей.

На рис. 1.4(ж) приведен ПФ, состоящий из трех активных сопротивлений, индуктивностей и конденсаторов.

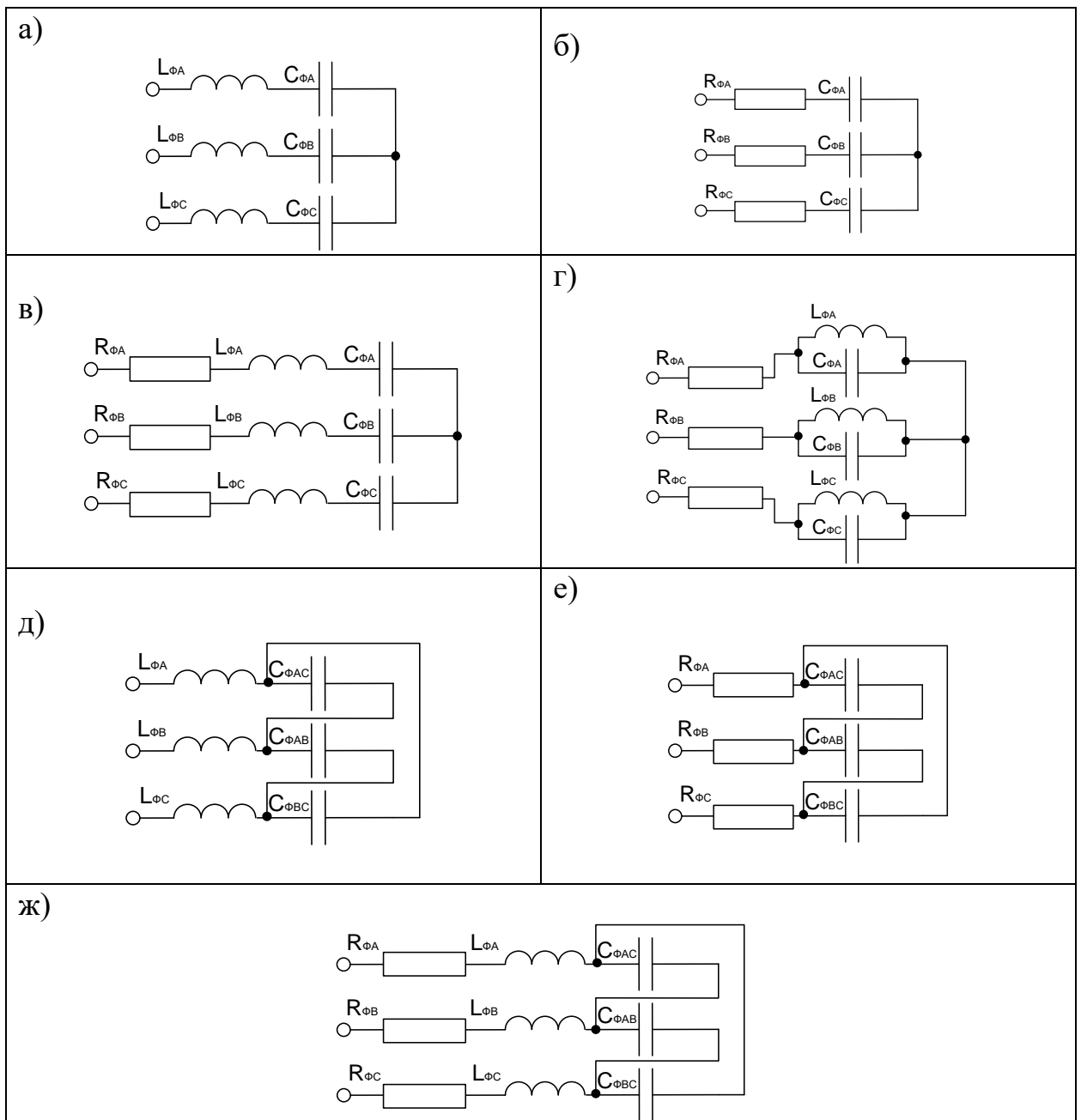


Рисунок 1.4 - Трехфазные пассивные фильтры ВГС: а) последовательный индуктивно-емкостной фильтр; б) последовательный активно-емкостной фильтр; в) последовательный активно-индуктивно-емкостной фильтр; г) фильтр с активной составляющей и колебательными контурами; д) последовательный фильтр с индуктивностями и треугольником емкостей; е) последовательный фильтр с активными сопротивлениями и треугольником емкостей; ж) последовательный фильтр с активными сопротивлениями и индуктивностями, соединенными с треугольником емкостей

Активные сопротивления и индуктивности подсоединены последовательно к трем фазам треугольника емкостей.

Активные фильтры ВГС приведены на рис. 1.5.

На рис. 1.5а приведен АФВГ с емкостным накопителем и параллельным подключением к сети.

На рис. 1.5б приведен АФВГ с индуктивным накопителем и параллельным подключением к сети.

На рис. 1.5в приведен АФВГ с емкостным накопителем и последовательным подключением к сети через согласующие трансформаторы.

На рис. 1.5г приведен АФВГ с индуктивным накопителем и последовательным подключением к сети через согласующие трансформаторы.

На рис. 1.5д приведен АФВГ гибридный с емкостными накопителями и последовательно-параллельным подключением к сети.

Комбинированные ФКУ приведены на рис. 1.6.

На рис. 1.6а приведен комбинированный фильтр с параллельными подключениями к сети ПФ и АФВГ.

На рис. 1.6б приведен комбинированный фильтр с параллельным подключением к сети ПФ, к которому последовательно подключен АФВГ.

На рис. 1.6в приведен комбинированный фильтр с параллельными подключениями к сети ПФ и АФВГ, подключенным через согласующие трансформаторы.

Из пассивных фильтров наибольшее распространение получили индуктивно-емкостные фильтры (рис.1.4а). Из активных фильтров наибольшее распространение получили АФВГ с параллельным подключением к сети и емкостным накопителем (рис.1.5а). Из комбинированных фильтров наибольшее распространение получили фильтры с параллельным подключением к сети ПФ и АФВГ (рис.1.6а) [21, 33, 44, 63, 172, 173, 175 - 177, 182, 214, 215, 237, 241].

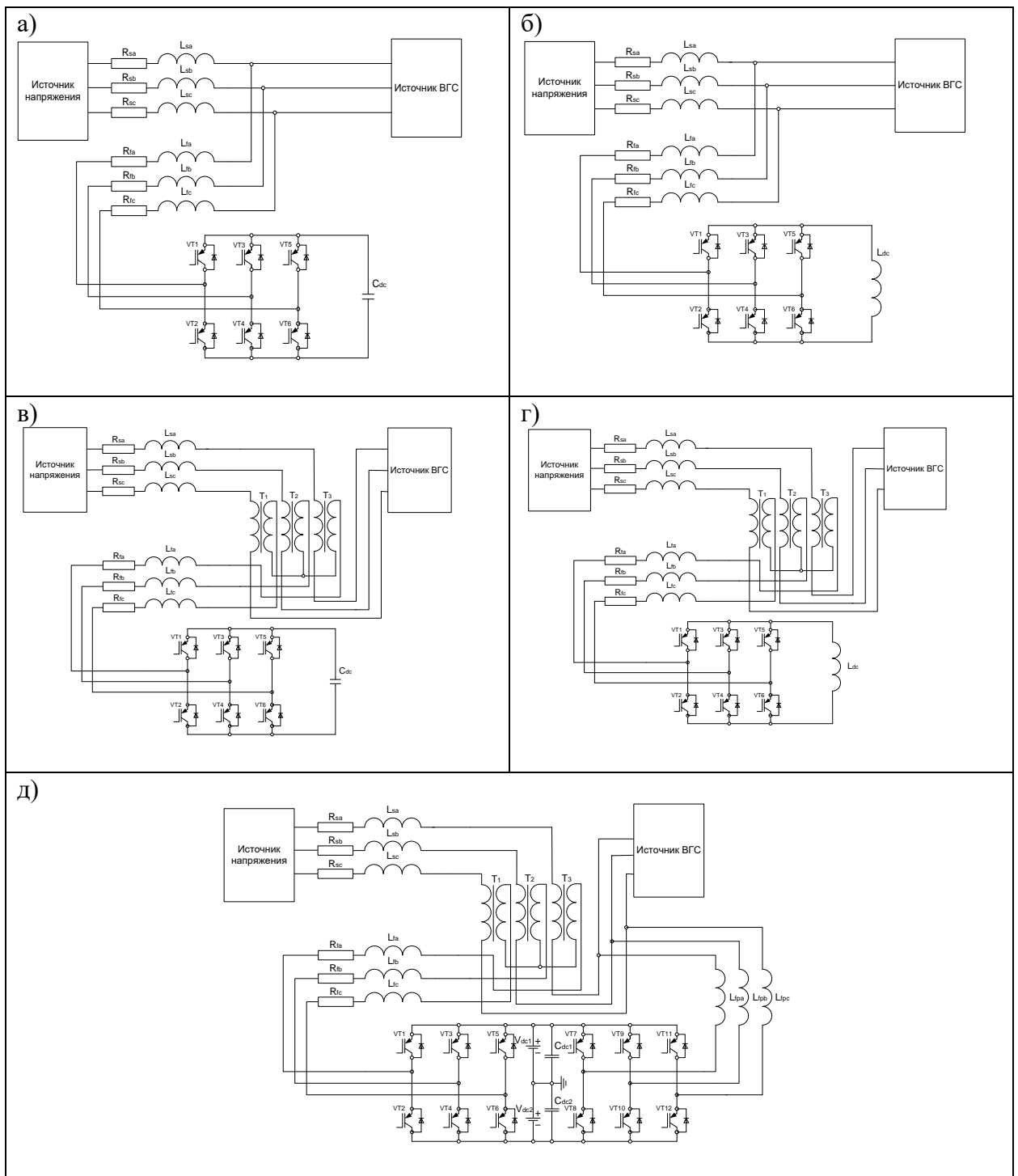


Рисунок 1.5 – Активные фильтры ВГС: а) с емкостным накопителем и параллельным подключением к сети; б) с индуктивным накопителем и параллельным подключением к сети; в) с емкостным накопителем и последовательным подключением к сети через согласующие трансформаторы; г) с индуктивным накопителем и последовательным подключением к сети через согласующие трансформаторы; д) гибридный с емкостными накопителями и последовательно-параллельным подключением к сети [240]

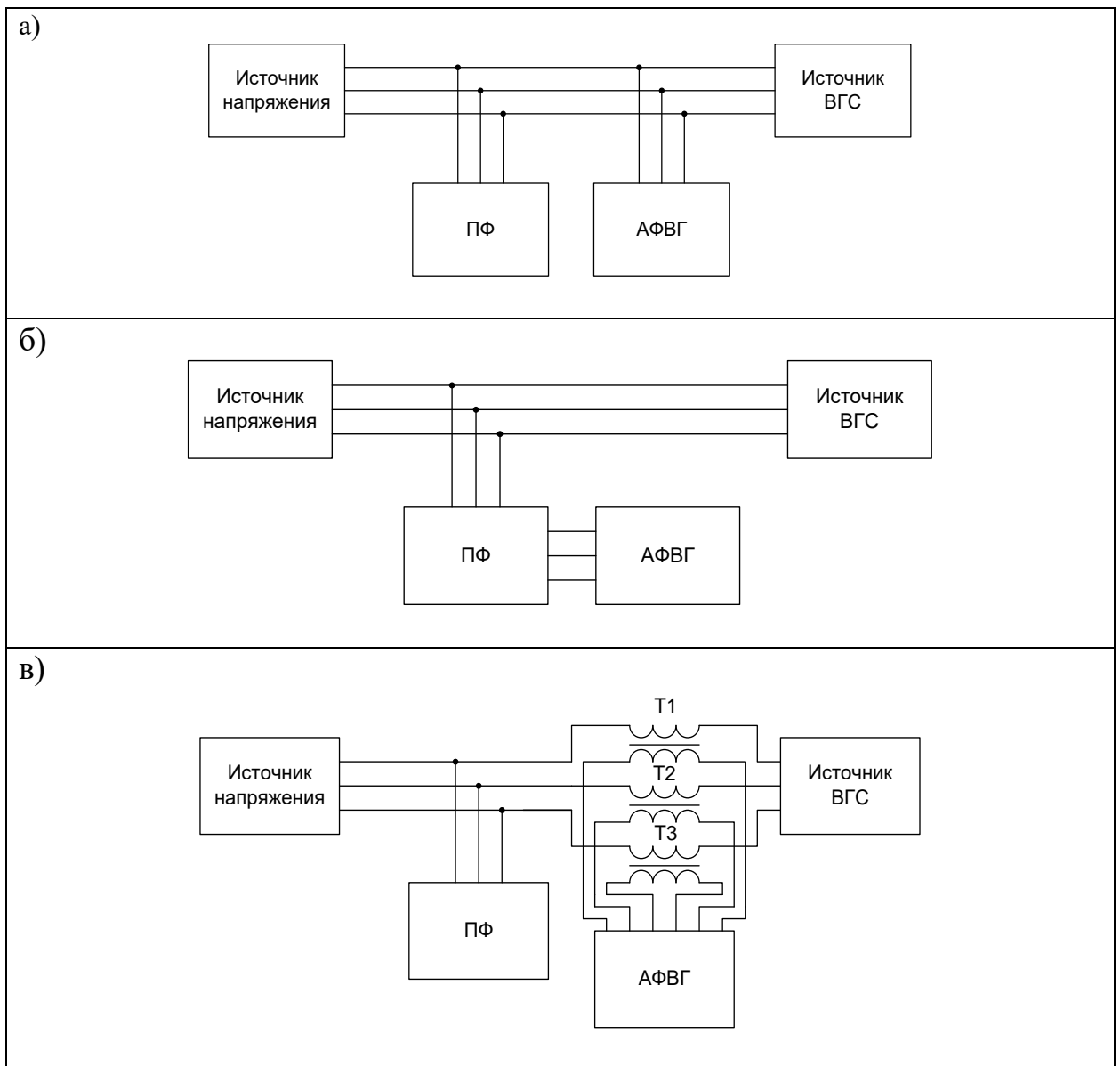


Рисунок 1.6 - Комбинированные фильтры ВГС: а) с параллельными подключениями к сети ПФ и АФВГ; б) с параллельным подключением к сети ПФ, к которым последовательно подключен АФВГ; в) с параллельными подключениями к сети ПФ и АФВГ, подключенным через согласующий трансформатор

В настоящее время в условиях подземных электрических сетях угольных шахт ФКУ практически не используются [106, 134, 163, 164, 168, 170, 171, 182].

1.4 Обоснование и постановка задач диссертационного исследования

На основании результатов проведенного в настоящей главе анализа сформулированы задачи диссертационного исследования:

1. Развитие методологии исследования режимов генерирования ВГС преобразовательными устройствами систем электроприводов технологического оборудования с учетом специфики ЭТС угольных шахт.
2. Проведение экспериментальных исследований ПКЭ в условиях ЭТС угольных шахт.
3. Разработка имитационных моделей и моделирование режимов генерирования ВГС преобразовательными устройствами систем электроприводов ЭТС поверхностного и подземного комплексов угольных шахт.
4. Установление зависимостей суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения от соотношения нелинейной и линейной нагрузки электрооборудования выемочных и проходческих участков угольных шахт.
5. Обоснование применения ФКУ для обеспечения требуемых ГОСТ 32144–2013 значений ПКЭ в подземных участковых сетях угольных шахт.
6. Установление закономерностей, влияющих на эффективность функционирования ЭТС угольных шахт.
7. Реализация научно-технических решений для обеспечения повышения эффективности функционирования ЭТС угольных шахт.

Глава 2. Экспериментальное исследование показателей качества электроэнергии в системах электроснабжения угольных шахт

2.1 Общая характеристика экспериментального исследования

Для исследования режимов генерирования ВГС целесообразно выполнить декомпозицию ЭТС угольной шахты на отдельные части, гальванически не связанные между собой [188].

Блок-схема декомпозиции ЭТС угольной шахты, приведенная на рис. 2.1, включает три уровня:

- первый уровень:
 - входные коммутационные аппараты ГПП,
 - соединительные электрические линии,
 - 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,
 - коммутационные аппараты,
 - первичные обмотки трансформаторных подстанций энергопоездов участков,
 - высоковольтные электропотребители с линейной и нелинейной нагрузкой поверхностного и подземного комплекса;
- третий уровень:
 - вторичные обмотки трансформаторных подстанции энергопоездов участков,

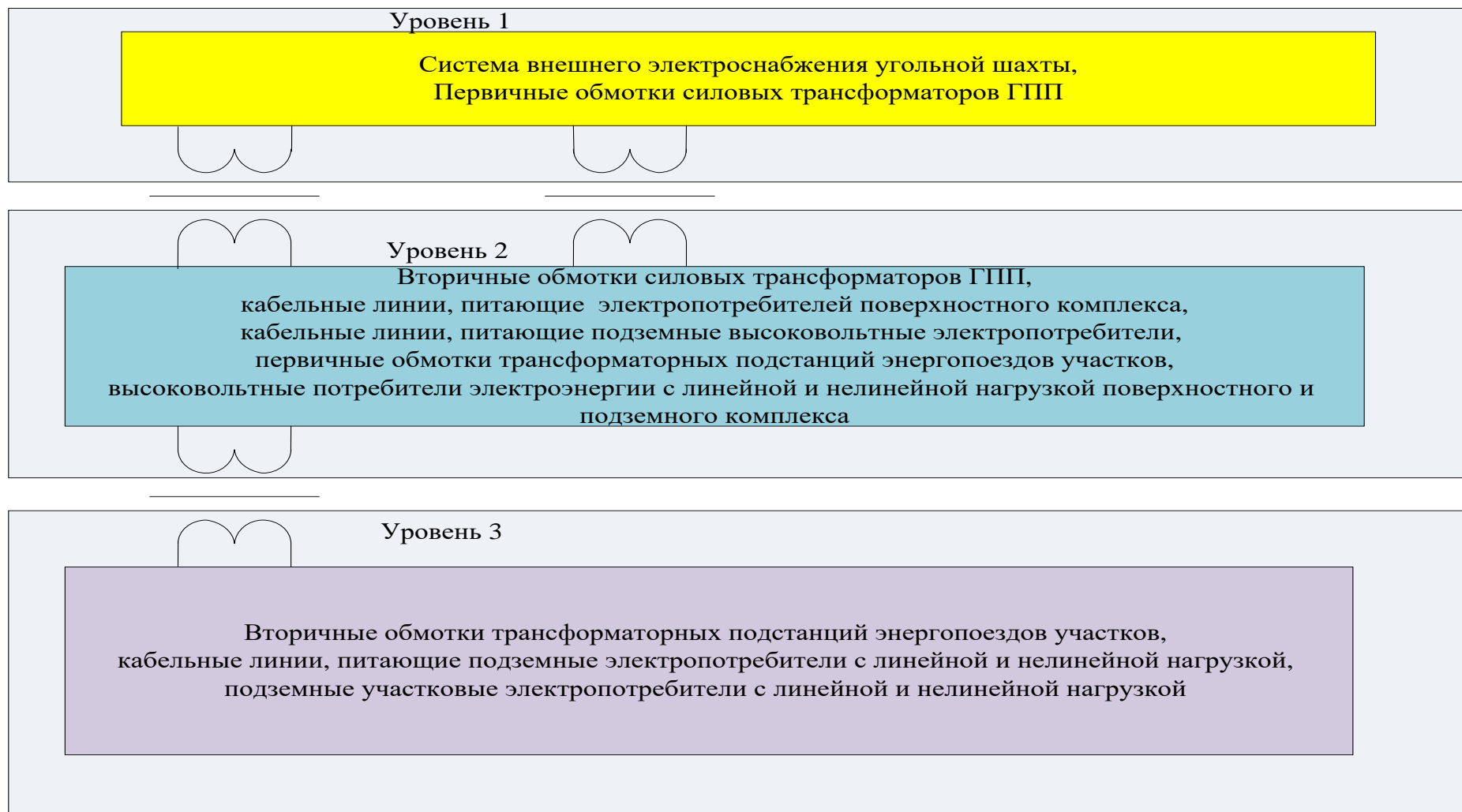


Рисунок 2.1 – Блок-схема декомпозиции ЭТС угольной шахты

- коммутационные аппараты,
 - кабельные линии, питающие подземные электропотребители с линейной и нелинейной нагрузкой,
- 1) подземные участковые электропотребители с линейной и нелинейной нагрузкой.

Вышеприведенная декомпозиция применена в исследованиях режимов генерирования и имитационного моделирования ВГС в ЭТС поверхностного и подземного комплексов угольной шахты.

2.2 Методика экспериментального исследования показателей качества электроэнергии в системах электроснабжения угольных шахт

Методика экспериментального исследования показателей качества электроэнергии в системах электроснабжения угольных шахт в зависимости от наличия или отсутствия в системе электроснабжения ФКУ включает два этапа:

Этап 1. 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; разработка и реализация рекомендаций по корректировке параметров ФКУ; повторное измерение ПКЭ при скорректированных параметрах ФКУ; проверка ПКЭ на соответствие ГОСТ; в случае соответствия ПКЭ ГОСТ 32144–2013, завершение исследования; в случае несоответствия ПКЭ требуемым значениям, переход на этап 2;

Этап 2. Определение источников ВГС поверхностного и подземного комплексов; измерение ПКЭ поверхностного и подземного комплексов; проверку ПКЭ на соответствие ГОСТ 32144–2013; в случае соответствия ПКЭ ГОСТ, завершение исследования на поверхностном или подземном комплексе; при несоответствии ПКЭ определение уровня отклонения; разработка рекомендаций по повышению ПКЭ; реализацию рекомендаций по повышению ПКЭ; проверку ПКЭ на соответствие ГОСТ 32144–2013; в случае соответствия ПКЭ ГОСТ 32144–2013, завершение исследования; в случае несоответствия ПКЭ требуемым значениям, переход в начало этапа 2.

Блок-схема методики экспериментального исследования ПКЭ с учетом декомпозиции ЭТС приведена на рис. 2.2.

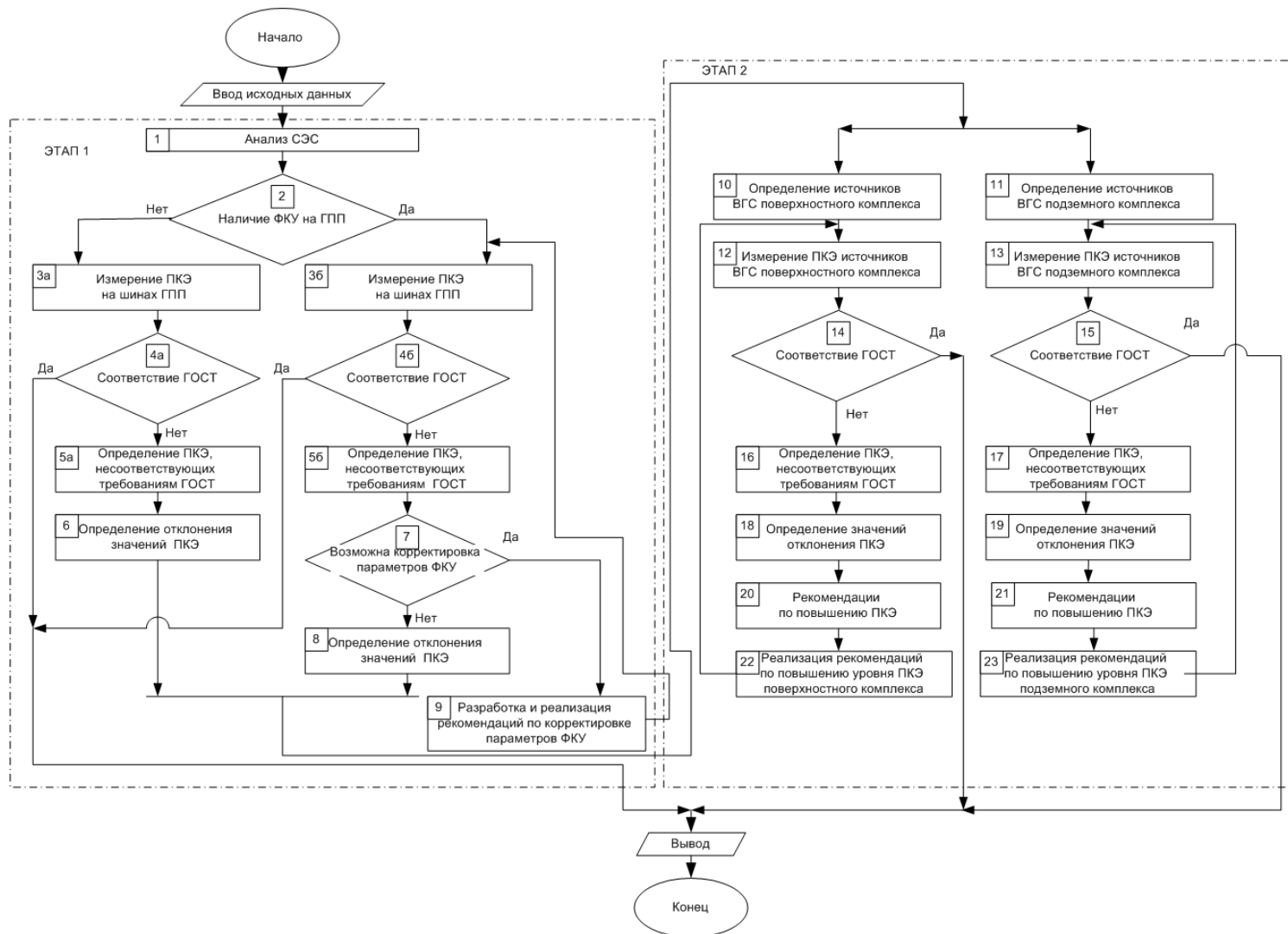


Рисунок 2.2 – Блок-схема методики экспериментального исследования ПКЭ, в системах электроснабжения угольных шахт, с учетом декомпозиции

Экспериментальное исследование ПКЭ проводится в следующей последовательности:

- 1) выполняется анализ ЭТС (п.1) на предмет наличия ФКУ (п.2);
- 2) производится измерение ПКЭ на шинах ГПП (п.3а и 3б);
- 3) проводится оценка ПКЭ на соответствие требуемым значениям ГОСТ 32144–2013 (п.4а и 4б):

3.1) при соответствии ПКЭ требуемым значениям ГОСТ 32144–2013, исследование завершается;

3.2) при несоответствии ПКЭ требованиям ГОСТ 32144–2013, переход на п.5а и 5б:

3.2.1) определяются ПКЭ, значения которых не соответствуют ГОСТ 32144–2013 (п.5а и 5б);

3.2.2) установление отклонения значений ПКЭ от требуемых ГОСТ 32144–2013 значений (п.6);

3.3) при наличии в ЭТС ФКУ, определяется возможность корректировки его параметров (п.7):

3.3.1) если корректировка параметров ФКУ возможна, то проводится разработка и реализация рекомендаций по корректировке его параметров (п.9) с возвращением в пункт измерения ПКЭ (п.3б);

3.3.2) если корректировка параметров ФКУ невозможна, то проводится установление отклонения значений ПКЭ от требуемых ГОСТ 32144–2013 значений (п.8);

- 4) определяются источники ВГС в электрической сети поверхностного комплекса (п.10);

- 5) проводится измерение ПКЭ (п.12) и их оценка на соответствие требуемым значениям ГОСТ 32144–2013 (п.14):

5.1) если значения ПКЭ соответствуют требуемым значениям ГОСТ 32144–2013, исследования в электрической сети поверхностного комплекса завершается;

- 5.2) если результаты замеров ПКЭ не соответствуют требованиям ГОСТ 32144–2013, то определяются ПКЭ, значения которых не соответствуют требуемым ГОСТ 32144–2013 (п.16), определяются отклонения значений ПКЭ от требуемых значений ГОСТ 32144–2013 (п.18), проводится разработка (п.20) и реализация рекомендаций по повышению уровня ПКЭ поверхностного комплекса (п.22) и возвращение в пункт измерения ПКЭ на источниках ВГС поверхностного комплекса (п.12);
- 6) определяются источники ВГС в электрической сети подземного комплекса (п.11);
- 7) проводится измерение ПКЭ (п.13) и их оценка на соответствие требуемым ГОСТ 32144–2013 значениям (п.15):
- 7.1) если значения ПКЭ соответствуют требуемым значениям, то исследования в электрической сети подземного комплекса завершаются;
- 7.2) если значения ПКЭ не соответствуют требованиям ГОСТ 32144–2013, то определяются ПКЭ значения которых не соответствуют требованиям ГОСТ 32144-2013 (п.17), определяется отклонения значений ПКЭ от требуемых ГОСТ 32144-2013 значений (п.19), проводится разработка (п.21) и реализация рекомендаций по установке ФКУ (п.23) и возвращение в пункт измерения ПКЭ на источниках ВГС подземного комплекса (п.13);
- 8) вывод и завершение экспериментального исследования ПКЭ в ЭТС 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 [38] и РД 153–34.0-15.501-00 «Методические указания по контролю и анализу качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» [180].

Для измерения ПКЭ в электрических сетях поверхностного комплекса угольных шахт применялись анализаторы «Ресурс-UF2М», *Fluke 435*. Для измерения ПКЭ в подземных электрических сетях применялся анализатор ПКЭ *Algodue Elettronica UPM 3080*, встроенный в комплектное распределительное устройство взрывобезопасное – 6 кВ (КРУВ-6).

Измерения ПКЭ в электрических сетях поверхностного комплекса угольных шахт проводились на шинах 6 кВ распределительных устройств понизительных подстанций. Экспериментальные измерения ПКЭ проводились в 23 точках подключения в суточном режиме.

Измерения ПКЭ в подземных электрических сетях угольных шахт проводились на вводной ячейке КРУВ-6 энергопоезда выемочного участка. Выполнено 2 замера, длительностью каждого – сутки. В месте с этим проводилось измерение тока и напряжения технологических электроприемников выемочного участка угольной шахты.

2.3 Экспериментальное исследование показателей качества электроэнергии в электрических сетях поверхностного комплекса

Экспериментальные исследования ПКЭ в электрических сетях поверхностного комплекса проведены на угольных шахтах: им. С.М. Кирова, Польшаевская, им. А.Д. Рубана, ш. Комсомолец, им. В.Д. Ялевского, «Заречная»

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

Среднесуточные значения измерений ПКЭ в электрических сетях 6 кВ поверхностного комплекса угольных шахт приведены в табл. 2.1.

В качестве примера на рис. 2.3–2.5 приведены осциллограммы отклонения напряжения, частоты, отклонения коэффициентов несимметрии нулевой и обратной последовательности измеренные, на шинах 1-й секции 6 кВ подстанции ПС-39 «ш. им. А.Д. Рубана» 35/6.

Спектрограммы коэффициентов n -ых гармонических составляющих напряжений и их допустимые значения для напряжения 6 кВ по ГОСТ 32144-2013 приведены на рис. 2.6: ПС-38 «ш. им. А.Д. Рубана» (1-я секция); ПС-39 «ш. им. А.Д. Рубана» (1-я секция); ПС-12 «ш. Польшаевская» (1-я секция).

ПКЭ в электрических сетях 6кВ поверхностного комплекса угольных шахт приведены в табл. 2.2. Отклонение значений K_U и δU от требуемых в электрических сетях 6 кВ по ГОСТ 32144-2013 угольных шахт приведены в табл. 2.3.

Таблица 2.1 – Показатели качества электроэнергии в электрических сетях 6 кВ поверхностного комплекса угольных шахт

№	Место измерения	ПКЭ				
		$\delta U_{(\pm)},$ % U_0	$\Delta f,$ Гц	$K_U,$ %	$K_{2U},$ %	$K_{0U},$ %
1	2	3	4	5	6	7
1	ПС-2 «ш. Заречная» (1 секция)	6,2	$\pm 0,05$	10,3	1,4	1,4
	ПС-2 «ш. Заречная» (2 секция)					
2	ПС-3 «ш. им. С.М. Кирова» (1 секция)	6,0	$\pm 0,04$	10,2	0,2	0,2
	ПС-3 «ш. им. С.М. Кирова» (2 секция)					
3	ПС-20 «ш. им. С.М. Кирова» (1 секция)	4,0	$\pm 0,05$	9,4	0,3	0,3
	ПС-20 «ш. им. С.М. Кирова» (2 секция)					
4	ПС-62 «ш. им. С.М. Кирова» (1 секция)	4,1	$\pm 0,05$	4,5	0,5	0,5
	ПС-62 «ш. им. С.М. Кирова» (2 секция)					
5	ПС-38 «ш. им. А.Д. Рубана» (1 секция)	7,3	$\pm 0,05$	10,3	0,7	0,7
	ПС-38 «ш. им. А.Д. Рубана» (2 секция)					
6	ПС-39 «ш. им. А.Д. Рубана» (1 секция)	12,3	$\pm 0,05$	11,5	0,5	0,5
	ПС-39 «ш. им. А.Д. Рубана» (2 секция)					
7	ПС-52 «ш. им. А.Д. Рубана» (1 секция)	9,0	$\pm 0,05$	12,9	1,1	1,1
	ПС-52 «ш. им. А.Д. Рубана» (2 секция)					
8	ПС-102 «ш. Комсомолец» (1 секция)	9,3	$\pm 0,05$	13,4	0,5	0,5
	ПС-102 «ш. Комсомолец» (2 секция)					

продолжение табл. 2.1

1	2	3	4	5	6	7
16	ПС-102 «ш. Комсомолец»	8,2	±0,05	12,2	0,9	0,9
	(2 секция)					
17	ПС-96 «ш. им. В.Д. Ялевского»	7,0	±0,05	9,3	0,2	0,2
	(1 секция)					
18	ПС - 35 «ш. им. В.Д. Ялевского»	4,1	±0,05	12,7	0,3	0,3
	110/35/6 (5 секция 6 кВ)					
19	ПС- 35 «ш. им. В.Д. Ялевского»	4,4	±0,05	11,8	1,2	1,2
	110/35/6 (6 секция 6 кВ)					
20	ПС-910 «ш. Польшаевская»	6,1	±0,05	13,2	0,5	0,5
	(1 секция)					
21	ПС-910 «ш. Польшаевская»	6,1	±0,05	11,8	0,2	0,2
	(2 секция)					
22	ПС-12 «ш. Польшаевская»	7,1	±0,03	13,5	1,5	1,5
	(1 секция)					
23	ПС-12 «ш. Польшаевская»	7,1	±0,05	13,4	1,5	1,5
	(2 секция)					

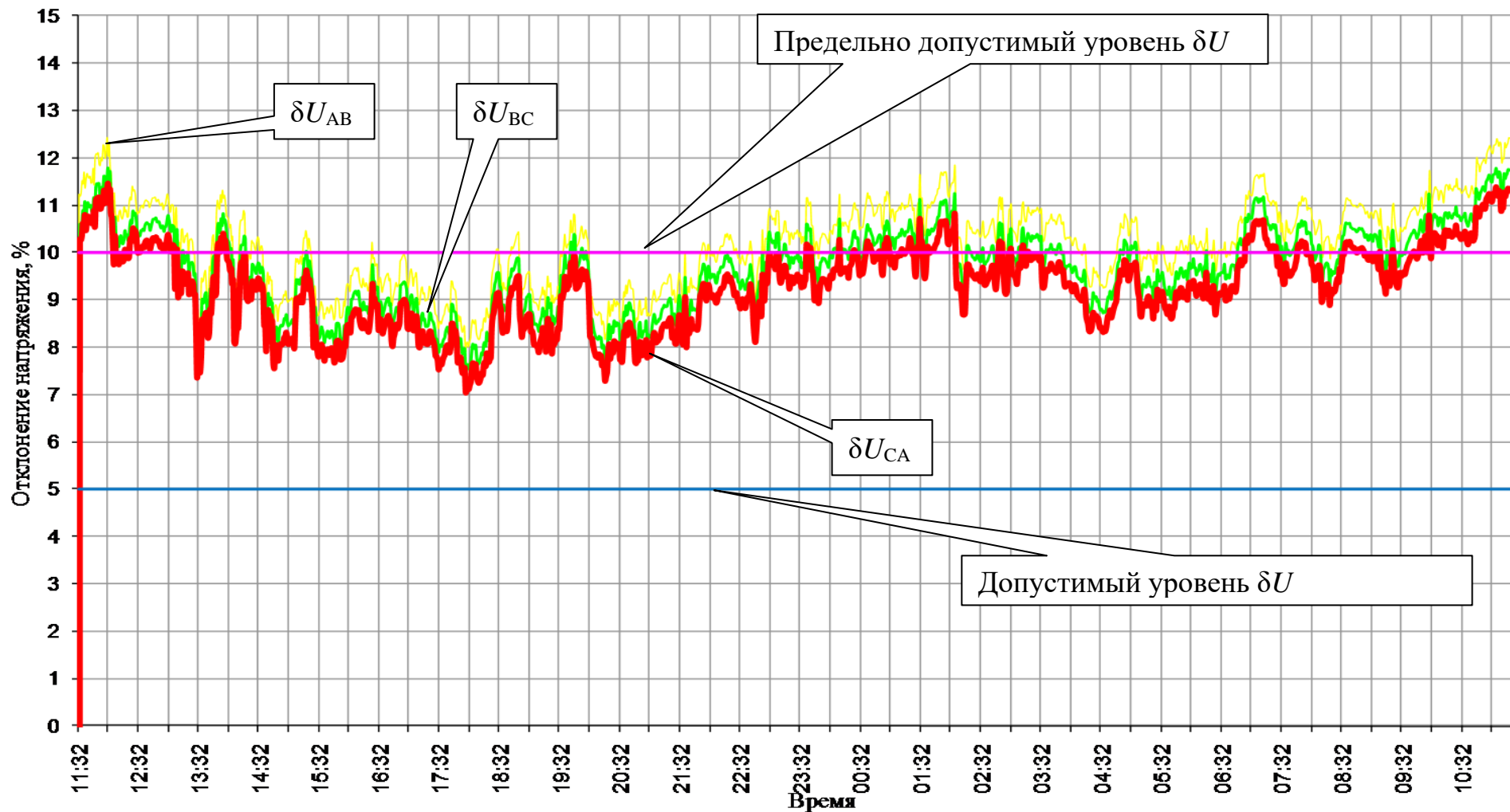


Рисунок 2.3 – Осциллограммы отклонения напряжения (1-я секция, 6 кВ) ПС-39 «ш. им. А.Д. Рубана»

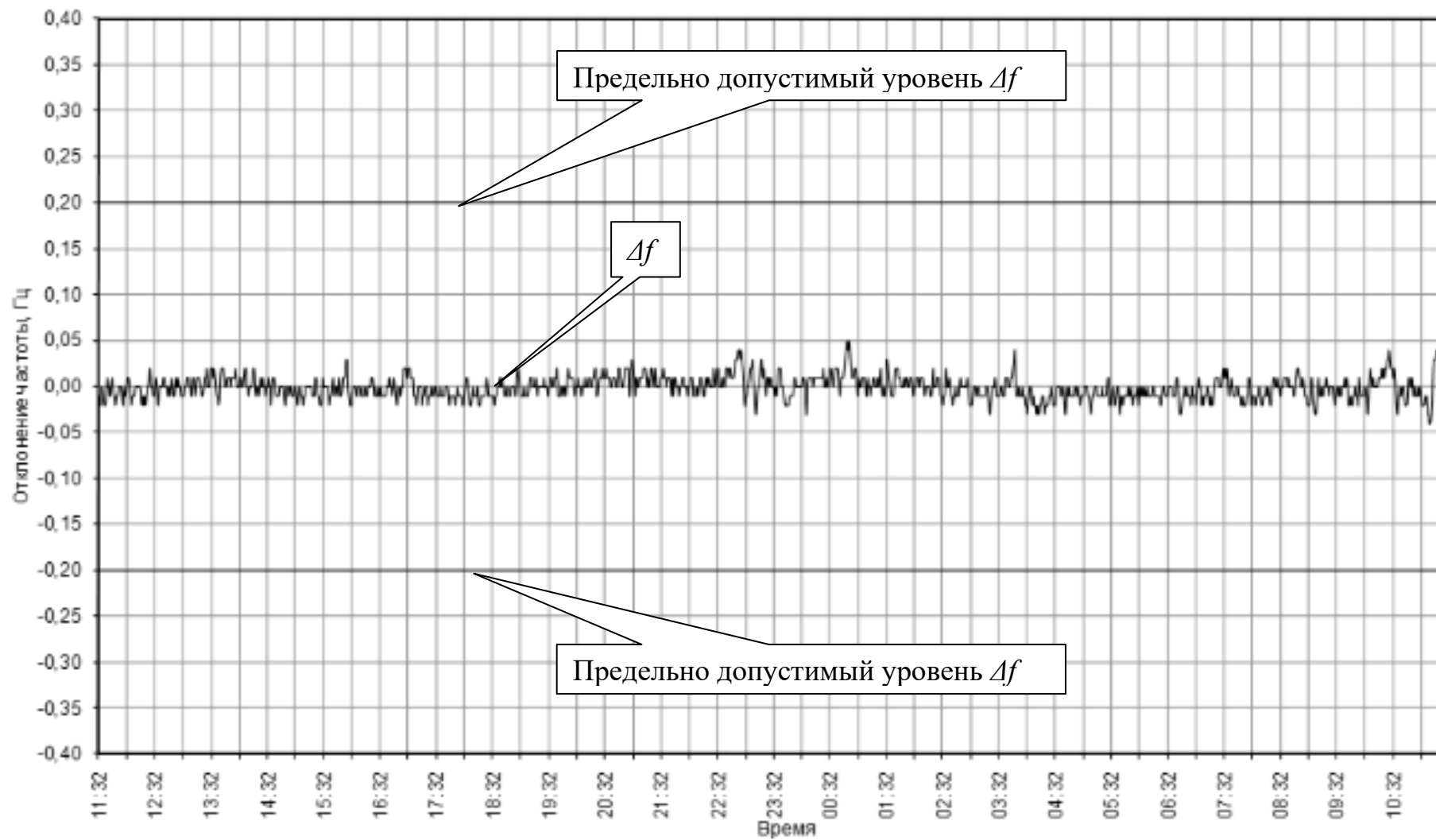


Рисунок 2.4 – Осциллограмма отклонения частоты (1-я секция, 6 кВ) ПС-39 «ш. им. А.Д. Рубана»

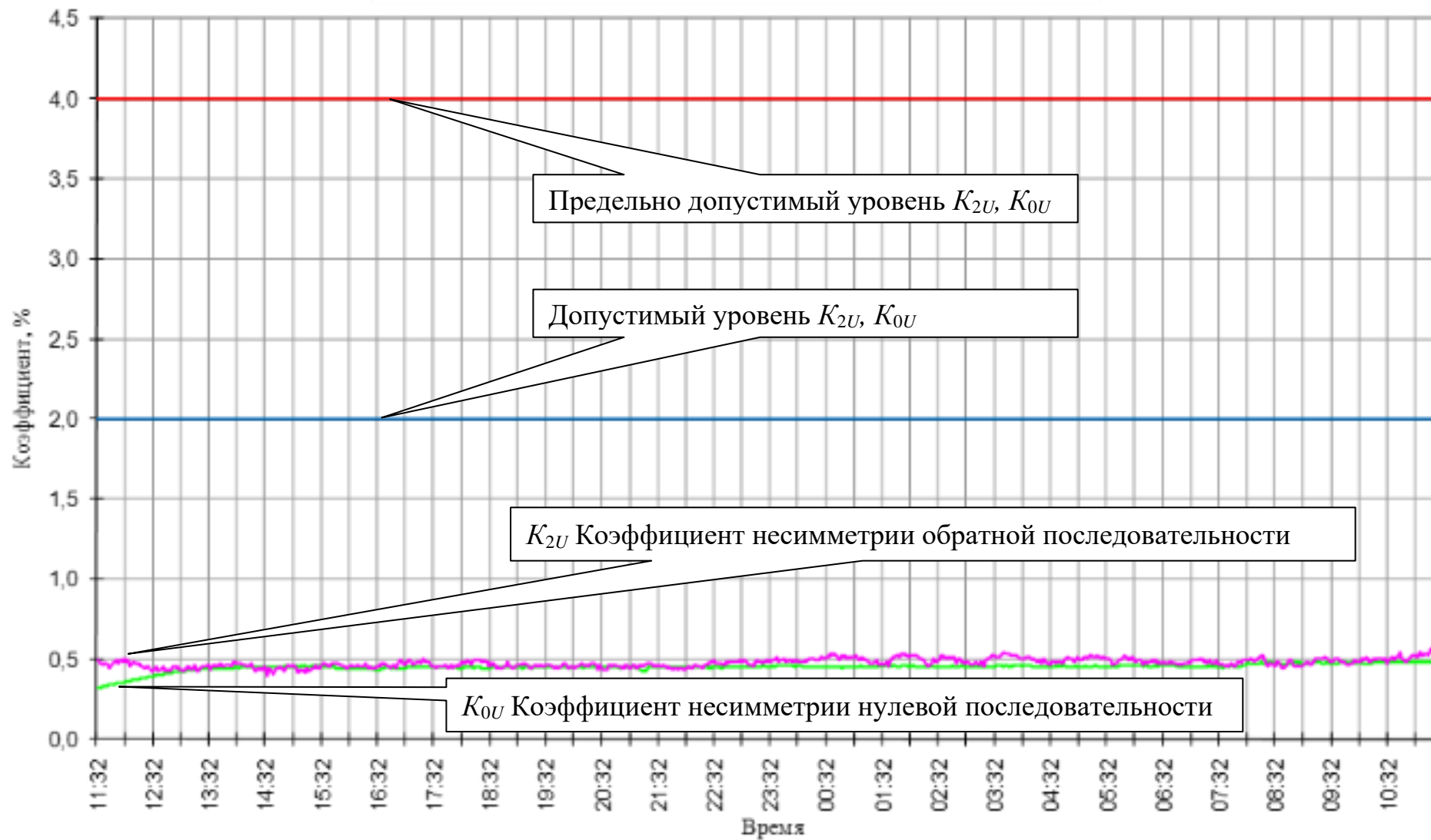


Рисунок 2.5 – Осциллограммы отклонений коэффициентов несимметрии нулевой и обратной последовательности (1-я секция, 6 кВ) ПС-39 «ш. им. А.Д. Рубана»

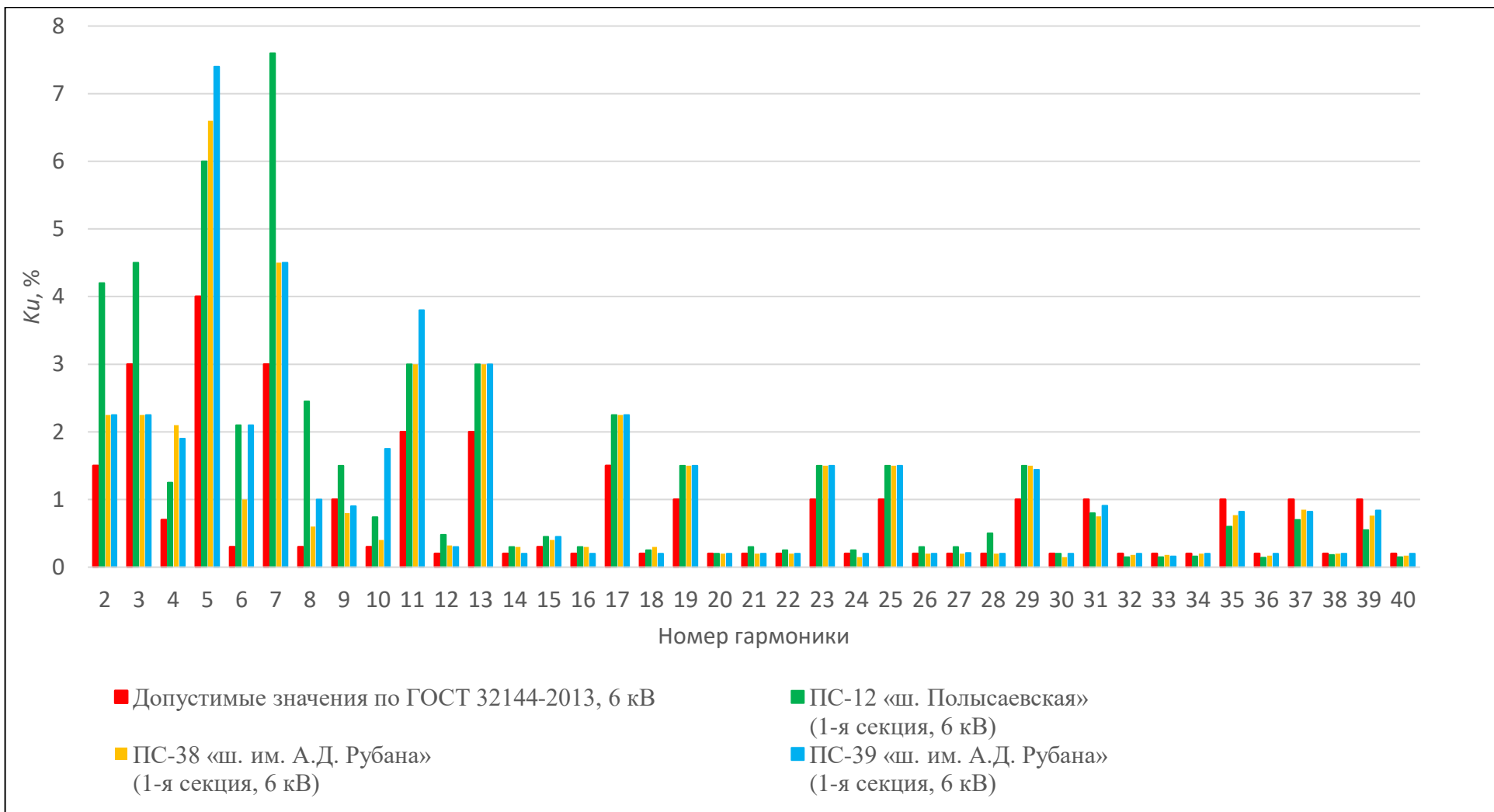


Рисунок 2.6 – Спектрограммы коэффициентов n -ых гармонических составляющих напряжения: допустимые значения ГОСТ 32144-2013 (6 кВ); ПС-38 «ш. им. А.Д. Рубана» (1-я секция, 6 кВ); ПС-39 «ш. им. А.Д. Рубана» (1-я секция, 6 кВ); ПС-12 «ш. Полысаевская» (1-я секция, 6 кВ)

Таблица 2.2 – ПКЭ в электрических сетях 6 кВ поверхностного комплекса угольных шахт

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

Таблица 2.3 Отклонение значений K_U и δU в электрических сетях 6 кВ поверхностного комплекса угольных шахт от требуемых по ГОСТ 32144-2013

№	Шахта	Подстанция	Секция шин	Отклонение ПКЭ	
				K_U , %	δU , %
1	Заречная	ПС-2	1 секция	5,3	нет
			2 секция	5,3	нет
2	им. С.М. Кирова	ПС-3	1 секция	5,2	нет
			2 секция	7,3	нет
		ПС-20	1 секция	4,4	нет
			2 секция	4,6	нет
		ПС-62	1 секция	нет	нет
			2 секция	нет	нет
3	им. А.Д. Рубана	ПС-38	1 секция	5,3	нет
			2 секция	5,8	нет
		ПС-39	1 секция	6,5	+2,3
			2 секция	6,8	+2,3
		ПС-52	1 секция	7,9	нет
			2 секция	7,4	нет
4	Полысаевская	ПС-12	1 секция	8,5	нет
			2 секция	8,4	нет
		ПС-910	1 секция	8,2	нет
			2 секция	5,8	нет
5	Комсомолец	ПС-102	1 секция	8,4	нет
			2 секция	6,2	нет
6	им. В.Д. Ялевского	ПС-35	5 секция	7,7	нет
			6 секция	6,8	нет
		ПС-96	1 секция	4,3	нет

Данные табл. 2.2 и табл. 2.3 показывают, что в электрических сетях 6 кВ поверхностного комплекса угольных шахт: отклонение частоты (Δf), коэффициенты несимметрии напряжения обратной (K_{2U}) и нулевой (K_{0U}) последовательностей удовлетворяют требованиям ГОСТ 32144-2013; суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения (K_U) на всех обследованных шахтах, за исключением ПС-62 «ш. им. С.М. Кирова», имеют значения, которые не удовлетворяют требованиям ГОСТ 32144-2013; отклонение напряжения (δU) удовлетворяют требованиям ГОСТ 32144-2013, за исключением ПС-39 «ш. им. А.Д. Рубана».

Проведенное экспериментальное исследование показывает, что значения ПКЭ в электрических сетях 6 кВ поверхностного комплекса угольных шахт (за исключением ПС-62 шахта им. С.М. Кирова) не удовлетворяют требованиям ГОСТ 32144-2013 и имеют отклонение значений суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения (K_U) в пределах 4,3 – 8,5 %.

Это подтверждает целесообразность проведения исследования режимов генерирования ВГС в электрических сетях угольных шахт.

2.4 Экспериментальное исследование показателей качества электроэнергии в подземных участковых электрических сетях 6 кВ

Экспериментальное исследование ПКЭ в подземных участковых электрических сетях ЭТС проведено на угольных шахтах АО «СУЭК – Кузбасс».

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).

В соответствии с приказом 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» выполнены измерения коэффициента мощности ($\cos\varphi$) на вводе схемы электроснабжения выемочных участков угольных шахт.

Спектрограммы значений коэффициентов n -ых гармонических составляющих напряжения в подземных электрических сетях угольных шахт «Полысаевская» и «им. С.М. Кирова» приведены на рис. 2.7. Значения коэффициентов n -ых гармонических составляющих напряжения ($K_{U(n)}$) измерены в фазах А и С, которые имели встроенные измерительные трансформаторы цепей релейной защиты КРУВ-6.

Суммарные коэффициенты гармонических составляющих напряжения (K_U), коэффициента мощности ($\cos\varphi$) в электрических сетях выемочных участков 6 кВ приведены в табл. 2.4.

Данные табл. 2.4 показывают, что в электрических сетях 6 кВ выемочных участков угольных шахт значения отклонения частоты (Δf) и напряжения (δU) имеют,

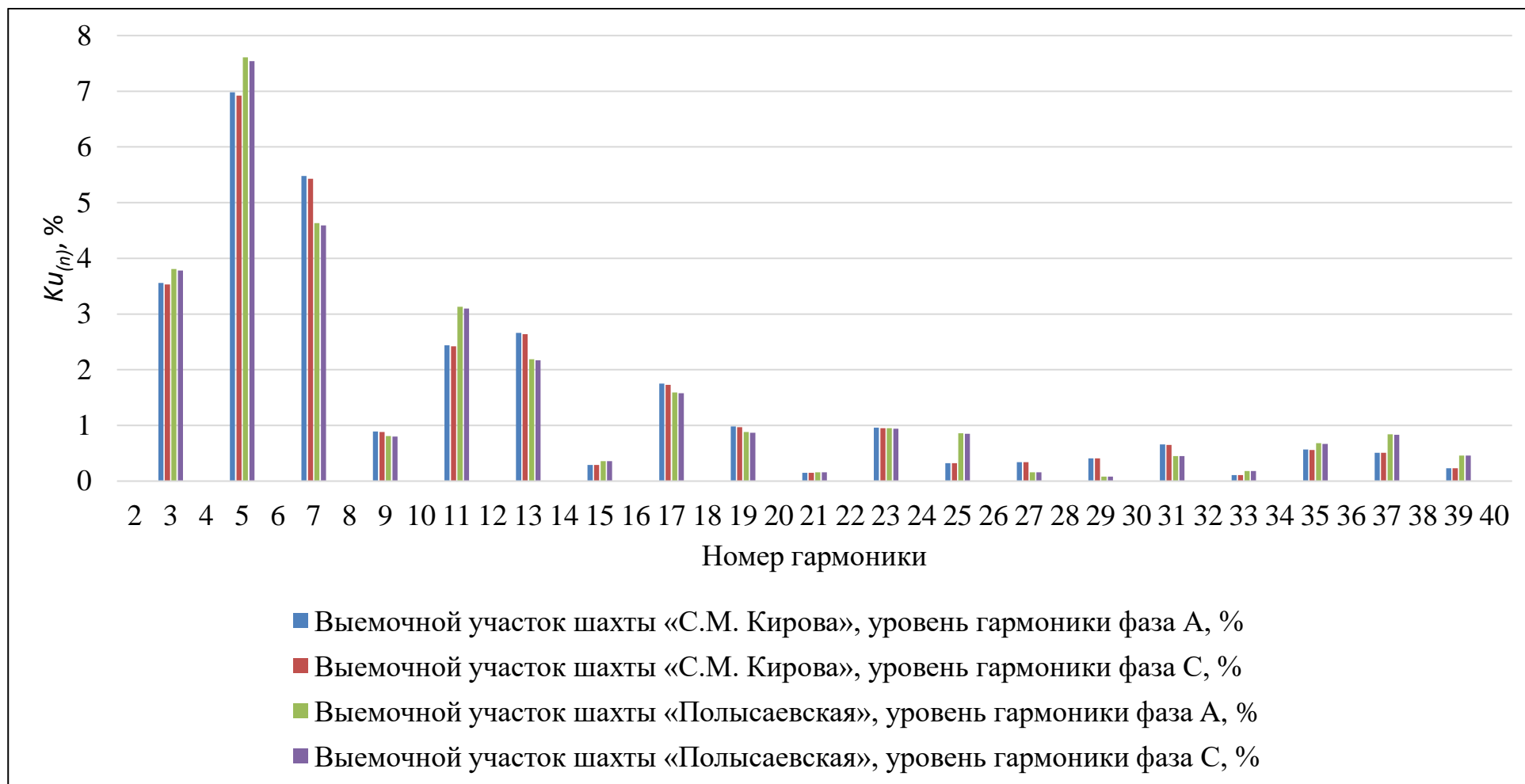


Рисунок 2.7 - Спектрограмма ВГС в подземных электрических сетях угольных шахт

Таблица 2.4 – Показатели качества электроэнергии и коэффициент мощности ($\cos\varphi$) в электрических сетях выемочных участков

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

удовлетворяют требованиям ГОСТ 32144-2013, значение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) не удовлетворяют требованиям ГОСТ 32144-2013.

Значения суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) составляют: по выемочному участку шахты «Польсаевская» - 10,72 %; по выемочному участку шахты «им. С.М. Кирова» - 11,31 %, что превышает требование ГОСТ 32144-2013, равное 5 %. Наибольшие значения коэффициента n -ой гармонической составляющей напряжения ($K_{U(n)}$) имеют 5, 7, 11 и 13 гармоники, что характерно для 6-ти пульсных преобразовательных устройств.

Значения коэффициента мощности ($\cos\varphi$) составляют: по выемочному участку шахты «Польсаевская» - 0,76; по выемочному участку шахты «им. С.М. Кирова» - 0,78. Эти значения, 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», являются невысокими.

Анализ ПКЭ показывает целесообразность разработки и установки устройств, ограничивающих уровень ВГС в подземных участковых ЭТС угольных шахт [133, 164, 170, 182].

При экспериментальном исследовании в подземных участковых электрических сетях проводились измерения тока, напряжения и активной мощности технологических электроприемников выемочного участка угольной шахты (выемочного комбайна, забойного конвейера, дробилки и перегружателя) (Приложении 3 табл. П.3.1 – П.3.4). Мгновенные значения тока, напряжения и активной мощности указанных электроприемников приведены на рис. 2.8 – 2.11.

Средние значения напряжения и тока электродвигателей основного технологического оборудования выемочных участков приведены в табл. 2.5.

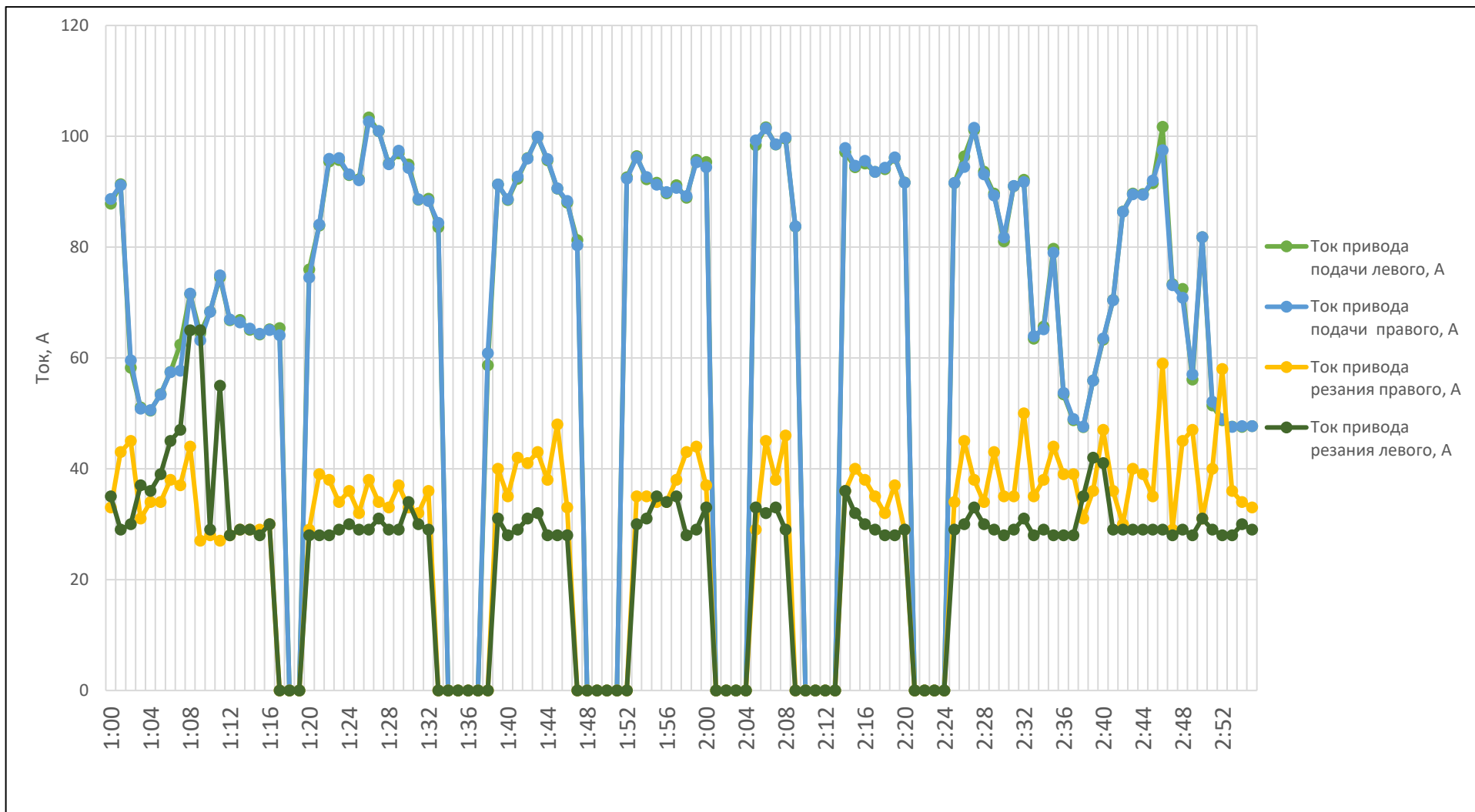


Рисунок 2.8 – Мгновенный ток электродвигателей резания и подачи
выемочного комбайна

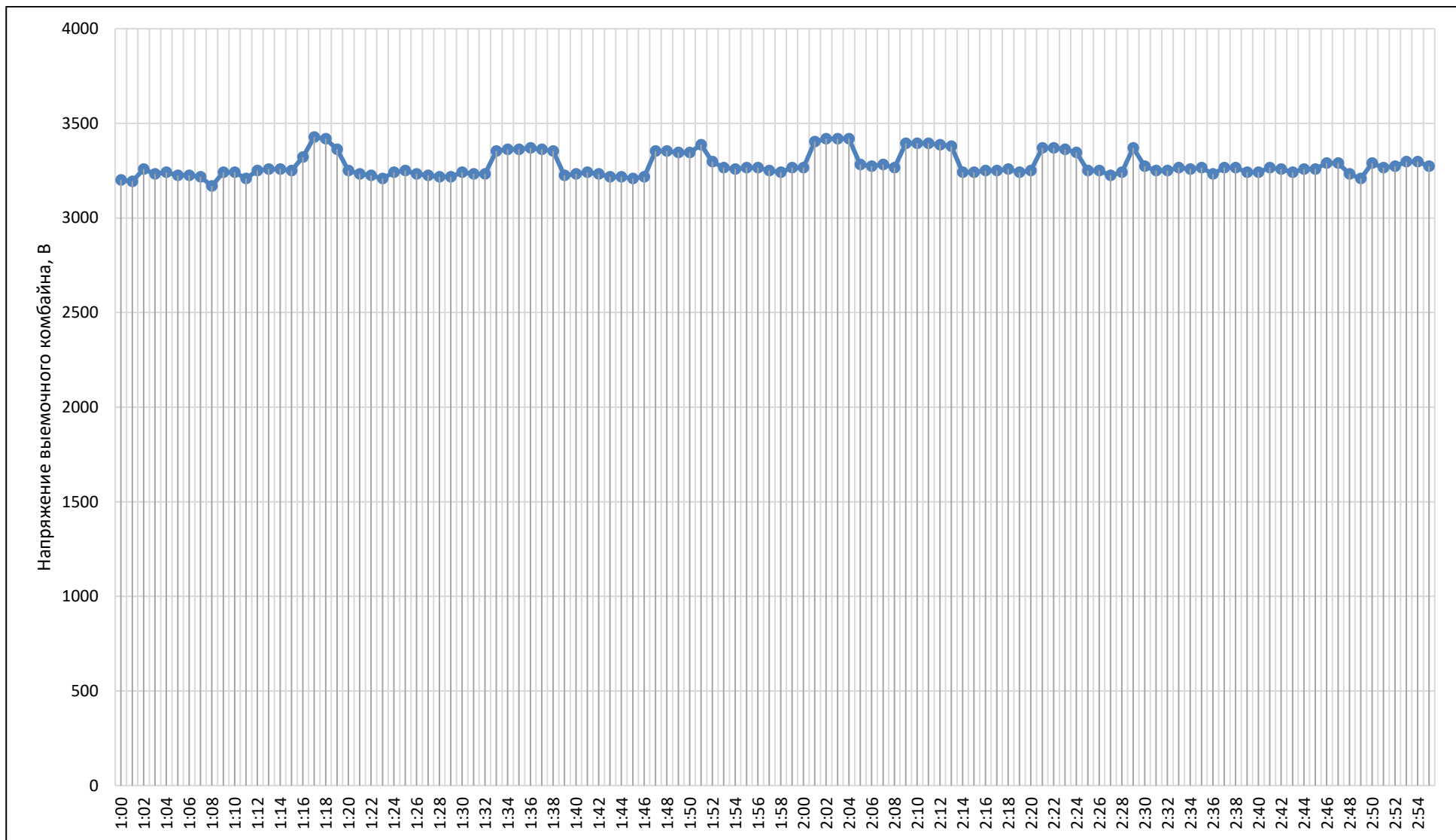


Рисунок 2.9 - Мгновенное напряжение электропитания выемочного комбайна

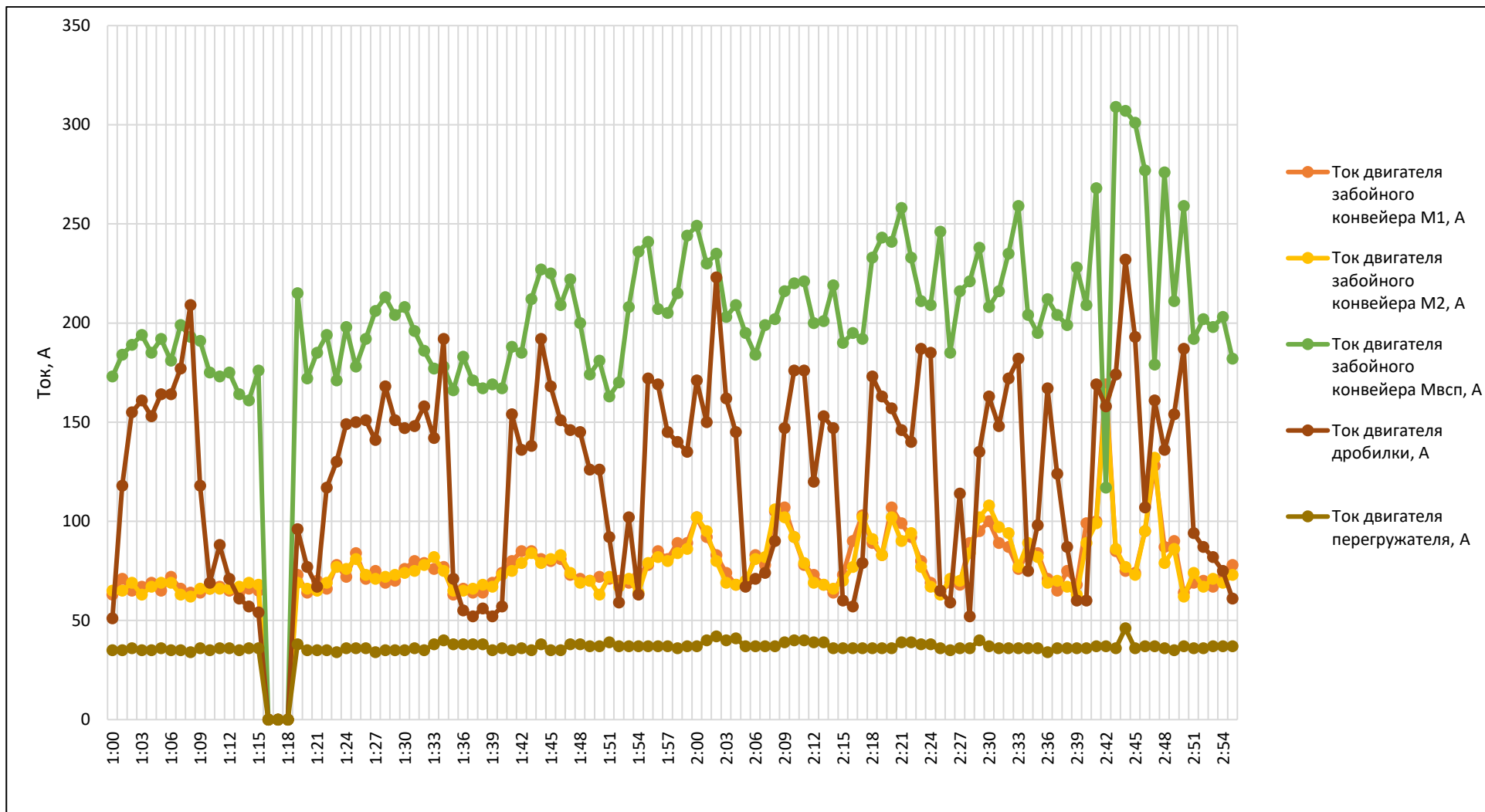


Рисунок 2.10 - Мгновенный ток электродвигателей забойного конвейера, дробилки, перегружателя

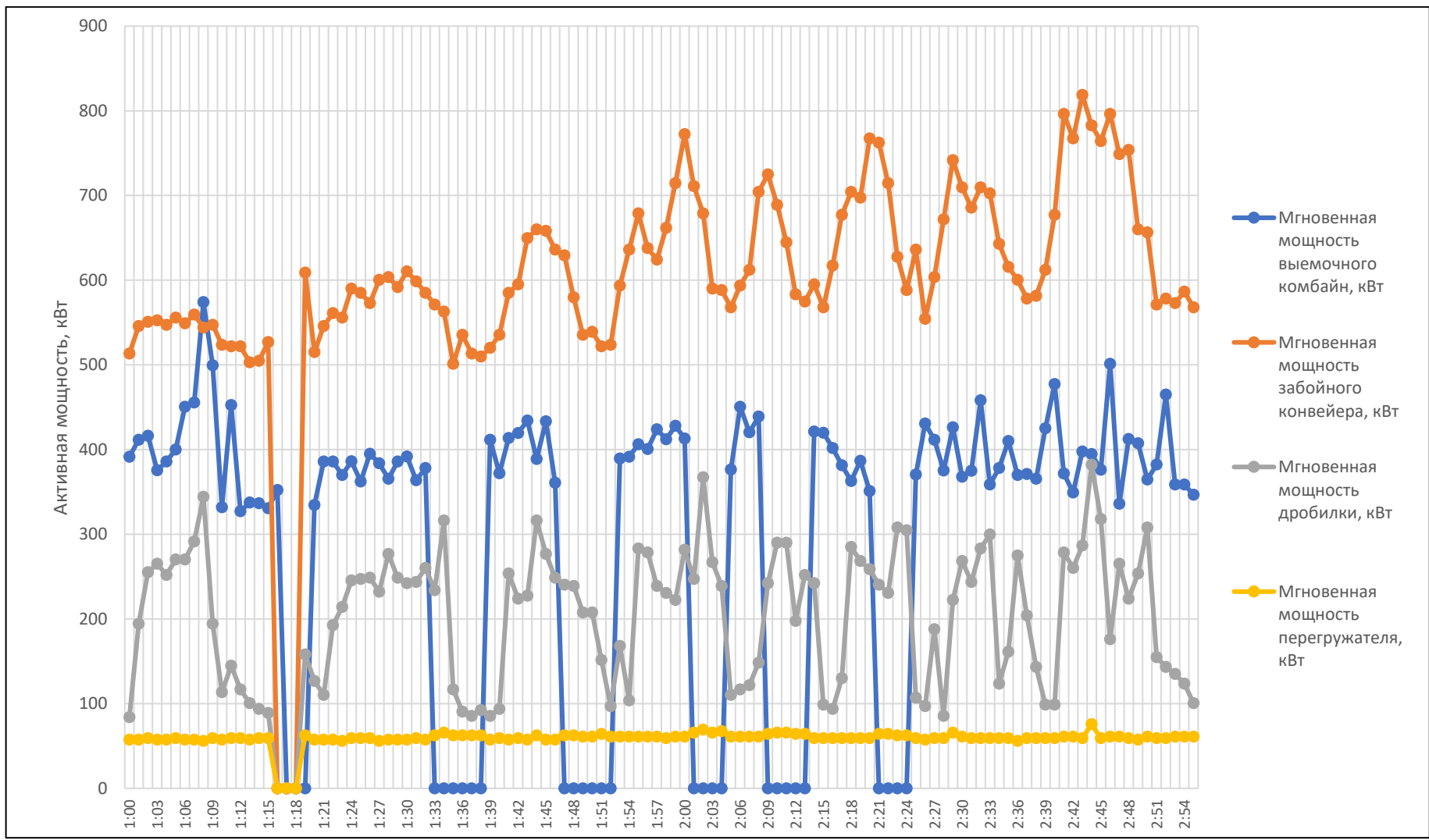


Рисунок 2.11 - Мгновенная мощность электроприводов выемочного комбайна, забойного конвейера, дробилки и перегружателя

Таблица 2.5 – Средние значения напряжения и тока электродвигателей основного технологического оборудования выемочных участков угольных шахт

Оборудование	Назначение привода	Напряжение, кВ	Ток, А
Выемочный комбайн	Органы резания	3,28	232,02
	Органы подачи	0,17	
Забойный конвейер	Основной привод	1,14	377,79
	Вспомогательный привод		
Дробилка	Привод дробилки	1,14	135,72
Перегружатель	Привод перегружателя	1,14	37,69

На момент проведения экспериментального исследования средняя скорость перемещения выемочного комбайна по участку составляла 6 м/мин, что соответствует уровню напряжения на выходе низковольтного преобразователя частоты, входящего в систему электропривода подачи, равного 0,17 кВ. Движение выемочного комбайна по участку с большей скоростью ограничено уровнем метановыделения при добыче угля подземным способом.

Результаты экспериментального исследования ПКЭ, тока и напряжения технологических электроприемников выемочного участка использовались в исследованиях режимов генерирования ВГС.

Анализ ПКЭ в подземных участковых ЭТС подтверждает актуальность проведения исследования режимов генерирования ВГС технологическими электроприемниками выемочных участков.

2.5 Выводы

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 требованиям 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 требованиям 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 требованиям 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 удовлетворяют требованиям 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 Польшаевская находятся в диапазоне 10,72 – 11,31 %, что превышает требования ГОСТ 32144-2013, равное 5 %;

3.4 значения коэффициента мощности ($\cos\varphi$) находятся в диапазоне 0,76 – 0,78%, что являются невысокими значениями согласно приказа 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 суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения (K_U) имеет значение, превышающее 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.

Глава 3. Исследование режимов генерирования высших гармонических составляющих преобразовательными устройствами систем управления электроприводами технологического оборудования угольных шахт

3.1 Исходные положения

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 % электрической нагрузки поверхностного комплекса (табл. 1.1).

Основными источниками генерирования ВГС в подземных участковых ЭТС являются выемочные комбайны, забойные конвейеры, перегружатели, нелинейная электрическая нагрузка которых, формируемая преобразовательными устройствами систем управления электроприводами, составляет 13,5 % электрической нагрузки подземного комплекса угольных шахт (табл. 1.1).

В связи с этим целесообразно исследовать режимы генерирования ВГС преобразовательными устройствами систем управления электроприводами технологического оборудования угольных шахт.

3.2 Технологические электропотребители как источники высших гармонических составляющих поверхностного и подземного комплексов угольных шахт

3.2.1 Технологические электропотребители поверхностного комплекса как источники высших гармонических составляющих

Характеристика электроприводов ШПУ, по типу и мощности приведена в табл. 3.1.

Одновигательные редукторные электроприводы ШПУ применяются для скиповых и клетьевых подъемов с мощностью электродвигателей 315–1600 кВт. Характерные системы управления такими электроприводами УВ-ДПТ приведены в [19, 20, 137, 140, 151 - 154, 188, 196, 218, 219].

Двухдвигательные редукторные электроприводы ШПУ применяются для скиповых и главных клетьевых подъемах с мощностью электродвигателей 630–3200 кВт. Двухдвигательные безредукторные электроприводы ШПУ применяется для скиповых и главных клетьевых подъемах с мощностью электродвигателей 630–6300 кВт. Характерные системы управления такими электроприводами УВ-ДПТ приведены в [19, 20, 137, 140, 151 - 154, 188, 196, 218, 219].

На вспомогательных клетьевых подъемах применяются одновигательные редукторные электроприводы ШПУ с мощностью электродвигателей 315–1250 кВт, а также двухдвигательные редукторные электроприводы ШПУ с мощностью электродвигателей 630–2500 кВт. Характерные системы управления такими электроприводами с релейно-контакторной системой управления асинхронным двигателем с фазным ротором приведены в [19, 20, 137, 140, 151 - 154, 188, 196, 218, 219].

Таблица 3.1 – Характеристика электроприводов ШПУ

Электропривод	Мощность электропривода, кВт	Вид подъема		
		Скиповой	Клетевой главный	Клетевой вспомог.
Одноводвигательный редукторный (УВ-ДПТ)	315 - 1600	Да	Да	Нет
Двухдвигательный редукторный (УВ-ДПТ)	630 - 3200	Да	Да	Нет
Двухдвигательный безредукторный (УВ- ДПТ)	630 - 6300	Да	Да	Нет
Одноводвигательный редукторный (АД ФР)	315 - 1250	Нет	Нет	Да
Двухдвигательный редукторный (АД ФР)	630 - 2500	Нет	Нет	Да
Одноводвигательный / двухдвигательный, безредукторный (ПЧ-СД)	свыше 6300	Да	Да	Нет

Одновдвигательный или двухдвигательный безредукторный электропривод ШПУ применяется на скиповых и клетевых подъемах при мощности электродвигателя свыше 6300 кВт. Характерная система управления таких электроприводов - ПЧ-СД [196]. Преобразовательными устройствами в системах управления электроприводами ШПУ служат как преобразователи частоты с непосредственной связью (НПЧ-СД), так и преобразователи частоты с активным выпрямителем и трехуровневым инвертором (ПЧ – СД) [1]. На рис. 3.1 приведена схема ПЧ-СД двухдвигательной ШПУ.

Наиболее распространенные системы электроприводов ШПУ УВ-ДПТ включают 6-пульсный преобразователь (рис.3.2) и генерируют 5-ю, 7-ю, 11-ю и 13-ю гармоники. Менее распространенные системы УВ-ДПТ включают 12-пульсный преобразователь (рис. 3.3) и генерируют 11-ю, 13-ю, 23-ю и 25-ю гармоники.

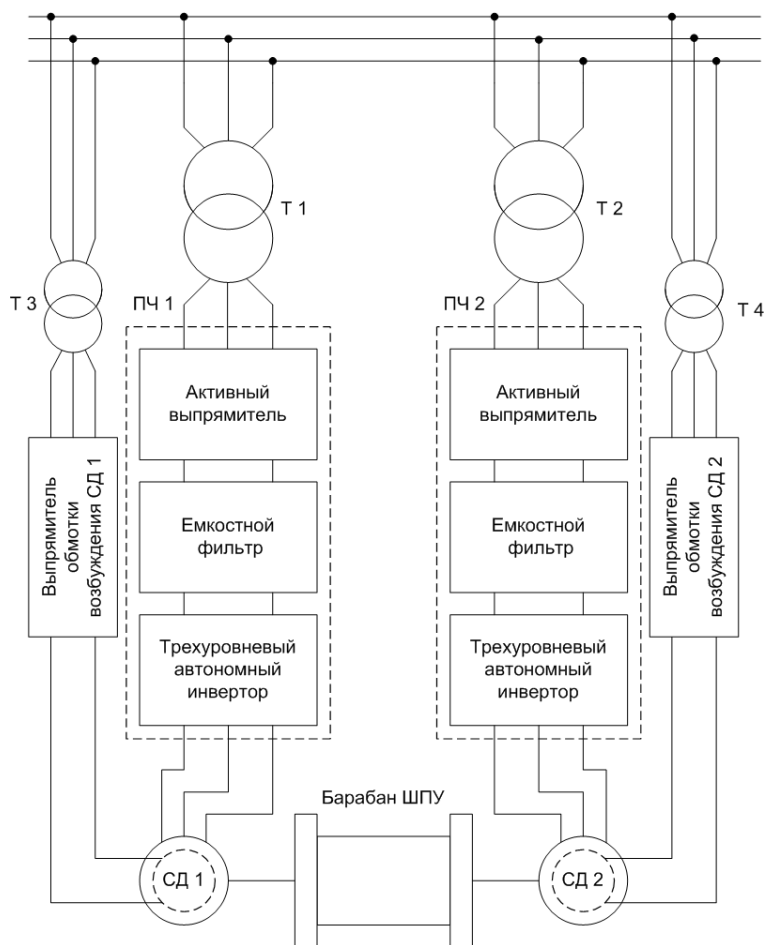


Рисунок 3.1 – Схема двухдвигательной ШПУ с ПЧ-СД

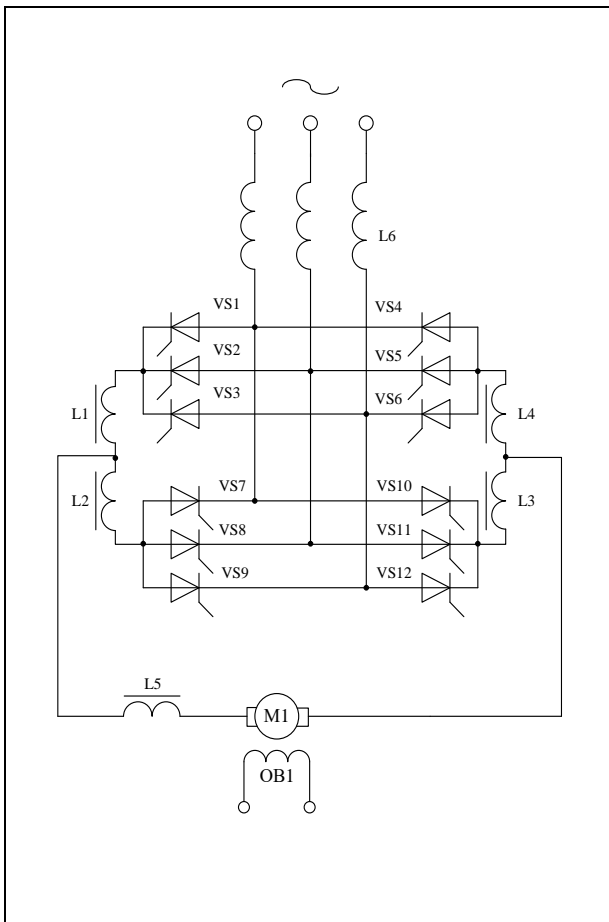


Рисунок 3.2 – Силовая часть 6-пульсной реверсивной системы УВ-ДПТ однодвигательной ШПУ

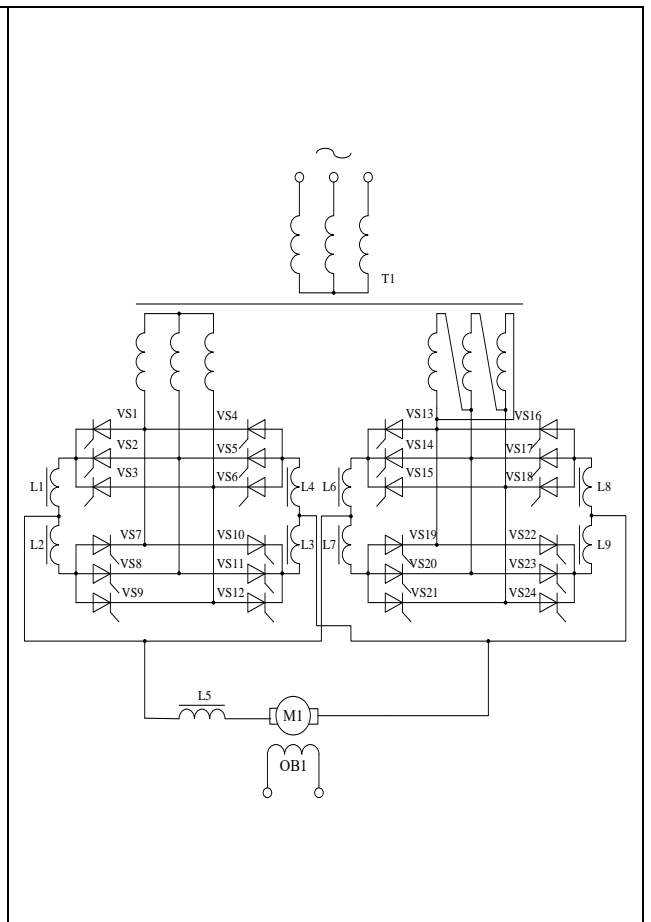


Рисунок 3.3 - Силовая часть 12-пульсной реверсивной системы УВ-ДПТ однодвигательной ШПУ

Схема с 6-ти и 12-ти пульсными системами управления электроприводом УВ-ДПТ ШПУ являются основными источниками генерирования ВГС в ЭТС поверхностного комплекса.

3.2.2 Технологические электропотребители выемочных и проходческих участков как источники высших гармонических составляющих подземного комплекса

Источниками генерирования ВГС технологическими электропотребителями выемочных и проходческих участков угольных шахт являются: на выемочных участках – выемочные комбайны, забойные конвейеры и перегружатели; на проходческих участках – проходческие комбайны.

Техническая характеристика выемочных комбайнов приведена в Приложении 4, табл. П.4.1.

Схемы электроприводов выемочных комбайнов приведены на рис. 3.4:

- на рис.3.4а приведена схема электроприводов выемочного комбайна с органами резания, оборудованными нерегулируемыми асинхронными электроприводами, органами подачи со схемой управления ПЧ – АД и нерегулируемыми асинхронными электроприводами гидравлической системы [166, 167, 171, 182];

- на рис.3.4б приведена схема электроприводов выемочного комбайна с органами резания, оборудованными нерегулируемыми асинхронными электроприводами, органами подачи со схемой управления УВ - ДПТ и нерегулируемыми асинхронными электроприводами гидравлической системы [166, 167, 171, 182].

Напряжение питания выемочных комбайнов – 1,14 кВ и 3,3 кВ.

Техническая характеристика проходческих комбайнов приведена в Приложении 4, табл. П.4.2.

Схемы электроприводов проходческих комбайнов приведены на рис. 3.5:

- на рис. 3.5а приведена схема с нерегулируемыми асинхронными электроприводами органа резания, подачи, гидросистемы, питателя и перегружателя проходческого комбайна;

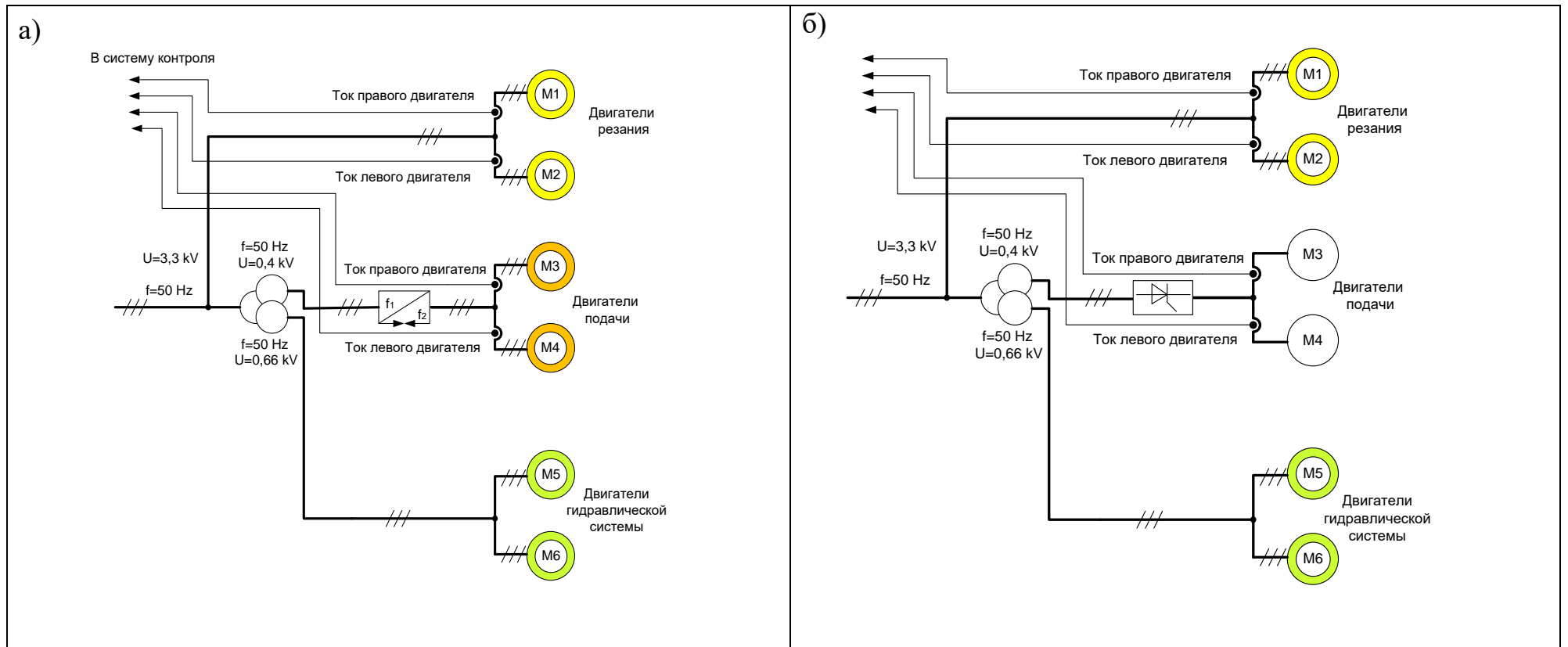


Рисунок 3.4 - Схемы электроприводов выемочных комбайнов: а) органы подачи с системой ПЧ – АД;

б) органы подачи с системой УВ – ДПТ

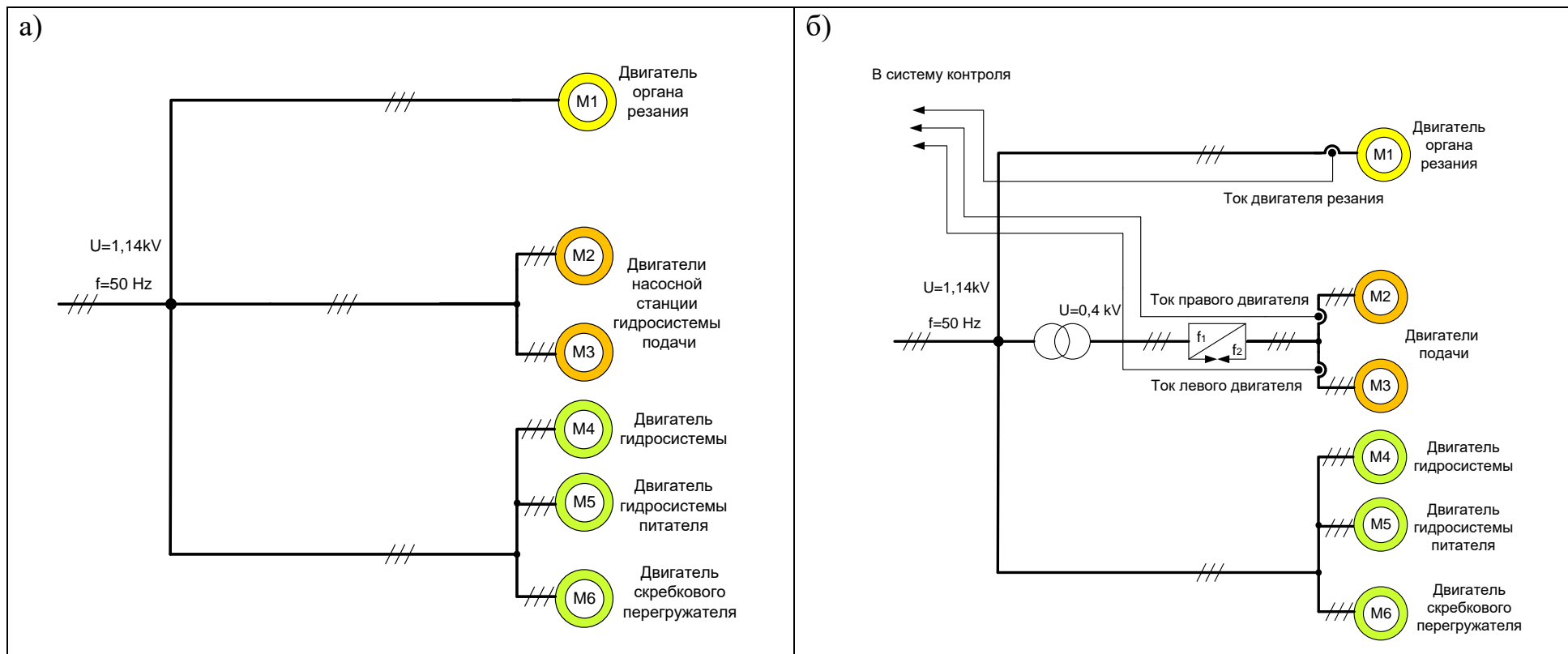


Рисунок 3.5 - Схемы электроприводов проходческих комбайнов: а) с нерегулируемыми электроприводами органа резания, подачи, гидросистемы, питателя и перегружателя проходческого комбайна; б) с регулируемым электроприводом органа подачи с системой управления ПЧ-АД

- на рис.3.5б приведена схема с нерегулируемыми электроприводами органа резания, гидросистемы, питателя, перегружателя и регулируемым асинхронным электроприводом органов подачи (ПЧ-АД) проходческого комбайна.

Техническая характеристика забойных конвейеров приведен в Приложении 4, табл. П.4.3.

Схемы электроприводов забойных конвейеров приведены на рис. 3.6:

- на рис.3.6а приведена трехдвигательная схема электропривода забойного конвейера включающая: основной привод, оборудованный двумя нерегулируемыми АД КЗ и вспомогательный привод, оборудованный регулируемым электроприводом ПЧ-АД с одним АД КЗ, служащего для плавного разгона скребковой цепи и ограничения ее рывков;

- на рис.3.6б приведена четырехдвигательная схема электропривода забойного конвейера включающая: основной привод оборудованный двумя нерегулируемыми АД КЗ и вспомогательный привод оборудованный регулируемой системой электропривода ПЧ-АД с двумя АД КЗ, служащего для плавного разгона скребковой цепи и ограничения ее рывков..

Напряжение питания забойного конвейера – 1,14 кВ.

Техническая характеристика перегружателей приведена в Приложении 4, табл. П.4.5.

Схемы перегружателей приведены на рис. 3.7:

- на рис.3.7а приведена двухдвигательная схема электропривода ПЧ-АД перегружателя, включающая: два АД КЗ и служащая для управления скоростью движения скребковой цепи;

- на рис.3.7б приведена однодвигательная схема электропривода ПЧ-АД перегружателя, включающая: один АД КЗ и служащая для управления скоростью движения скребковой цепи;

Напряжение питания перегружателя – 1,14 кВ.

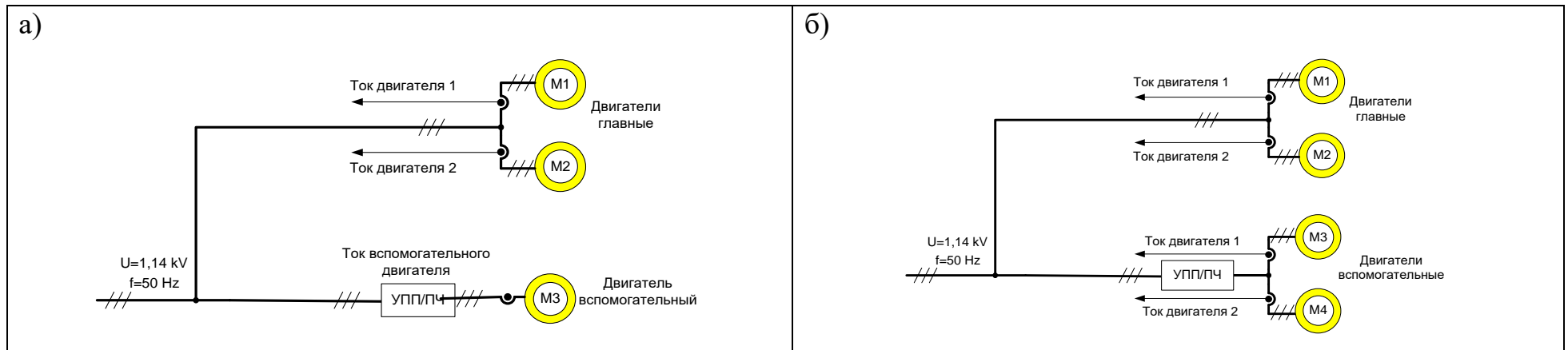


Рисунок 3.6 – Схемы электроприводов забойных конвейеров: а) трехдвигательная схема с нерегулируемыми электроприводами основных электродвигателей и регулируемым электроприводом вспомогательного электродвигателя
 б) четырехдвигательная схема с нерегулируемыми электроприводами основных электродвигателей и регулируемыми электроприводами вспомогательных электродвигателей

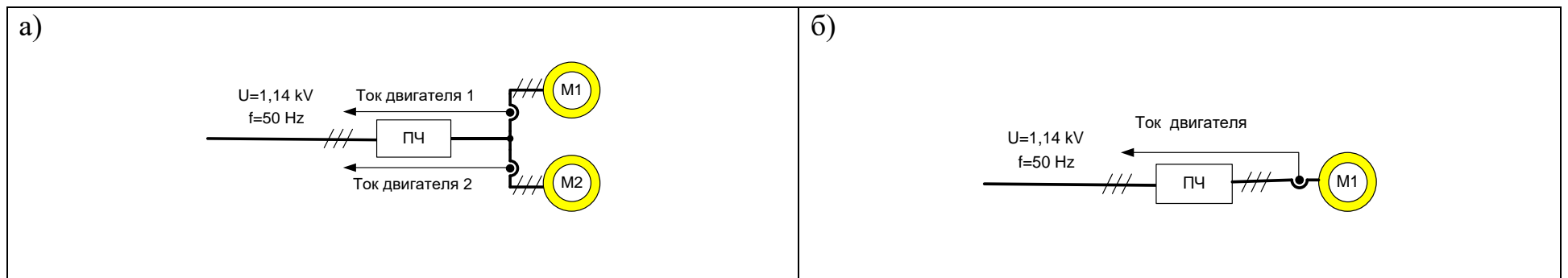


Рисунок 3.7 - Схемы электроприводов перегружателей а) двухдвигательная схема с регулируемыми электроприводами
 б) однодвигательная схема с регулируемым электроприводом

Дробилки оборудованы нерегулируемым электроприводом с прямым пуском АД-КЗ. Нелинейная нагрузка в схемах электроприводов дробилок отсутствует. Характеристика дробилок приведена в Приложении 4, табл. П.4.4. Напряжение питания дробилок – 1,14 кВ.

Анализ электроприемников ЭМС подземного комплекса угольных шахт показывает, что схемы управления электроприводами преимущественно имеют 6-ти пульсные преобразовательные устройства.

Таким образом источниками генерирования ВГС в подземном комплексе угольных шахт являются: органы подачи выемочных комбайнов с системами электропривода ПЧ-АД и УВ-ДПТ; органы подачи проходческого комбайна с системой электропривода ПЧ-АД; вспомогательные электропривода забойного конвейера с системами электропривода ПЧ-АД и УПП-АД; электропривод перегружателя с системой электропривода ПЧ-АД.

3.3 Методика имитационного моделирования режимов генерирования высших гармонических составляющих в электротехнических системах угольных шахт

Методика имитационного моделирования режимов генерирования ВГС в ЭТС угольных шахт включает: анализ схемы электроснабжения угольной шахты, измерение ПКЭ и электротехнических параметров технологических электроприемников; определение конфигурации и электротехнических параметров системы управления электроприводом основного технологического оборудования; установление 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 и результатами экспериментальных исследований; корректировку параметров ЭТС и подсистем технологических электроприемников имитационной модели при необходимости.

Блок-схема методики имитационного моделирования режимов генерирования ВГС в ЭТС угольных шахт приведена на рис. 3.8.

Имитационное моделирование режимов генерирования ВГС в ЭТС угольных шахт проводится в следующей последовательности:

- 1) анализ схемы электроснабжения угольной шахты, измерение ПКЭ и электротехнических показателей, для оценки адекватности имитационных моделей (п.1);
- 2) определение конфигурации и электротехнических параметров системы управления электроприводом основного технологического оборудования (п.2);
- 3) установление основных источников ВГС в ЭТС поверхностного и подземного комплексов (п.3);

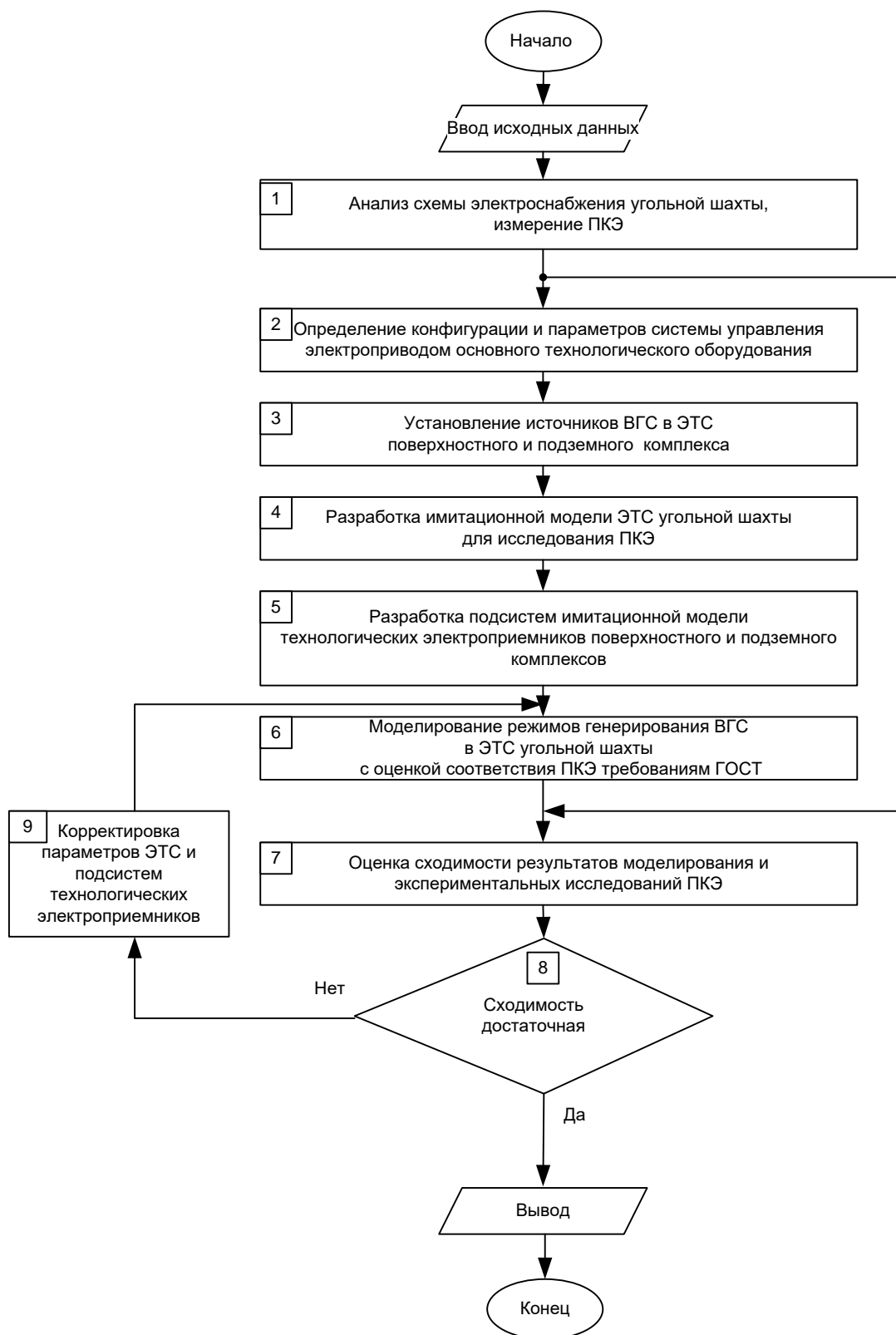


Рисунок 3.8 – Блок-схема методики имитационного моделирования режимов генерирования ВГС в ЭТС угольных шахт

- 4) разработка имитационной модели ЭТС угольной шахты для исследования ПКЭ (п.4);
- 5) разработка подсистем имитационной модели технологических электроприемников поверхностного и подземного комплексов (п.5);
- 6) моделирование режимов генерирования ВГС в ЭТС угольной шахты с оценкой соответствия ПКЭ ГОСТ 32144–2013 (п.6);
- 7) оценка сходимости результатов имитационного моделирования и результатов экспериментальных исследований ПКЭ (п.7):
 - 7.1) если сходимость высокая ($> 0,9$), то переход в пункт вывод с окончанием моделирования;
 - 7.2) если сходимость низкая ($< 0,9$), то переход в пункт корректировки параметров ЭТС и подсистем технологических электроприемников (п.9) и повторное моделирование режимов генерирования ВГС в ЭТС угольной шахты с оценкой соответствия ПКЭ ГОСТ 32144–2013 (п.6);
- 8) вывод и завершение имитационного моделирования режимов генерирования ВГС в ЭТС угольных шахт.

3.4 Исследование режимов генерирования высших гармонических составляющих преобразовательными устройствами систем управления электроприводами технологического оборудования угольных шахт

3.4.1 Исследование режимов генерирования высших гармонических составляющих электроприводами с системой «Управляемый выпрямитель – двигатель постоянного тока»

Исследование режимов генерирования ВГС электроприводами с системой УВ-ДПТ проведено с применением имитационного моделирования в соответствии с «Методикой имитационного моделирования режимов генерирования ВГС в ЭМС и ЭТС угольных шахт» приведенной в (п. 3.3).

Схема ЭМС УВ-ДПТ для исследования генерирования ВГС, включающая 6-ти пульсный управляемый выпрямитель, систему управления выпрямителем, вводной дроссель, двигатель постоянного тока приведена на рис.3.9.

Имитационная модель ЭМС с 6-ти пульсной системой УВ-ДПТ для исследования режимов генерирования ВГС ШПУ приведена на рис. 3.10.

В имитационную модель входят: трехфазный источник переменного напряжения; трехфазный универсальный измеритель напряжения; измеритель суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения; вводной дроссель; подсистема, имитирующая механическую часть подъемной установки; трехфазный управляемый выпрямитель; подсистема управления выпрямителем; двигатель постоянного тока с независимым возбуждением; источник постоянного тока для питания индуктора ДПТ; осциллографы для визуализации результатов имитационного моделирования. Подсистема управления выпрямителем приведена на рис. 3.11.

Моделирование проведено для ЭМС ШПУ с мощностью двигателя ШПУ равной 2500 кВт.

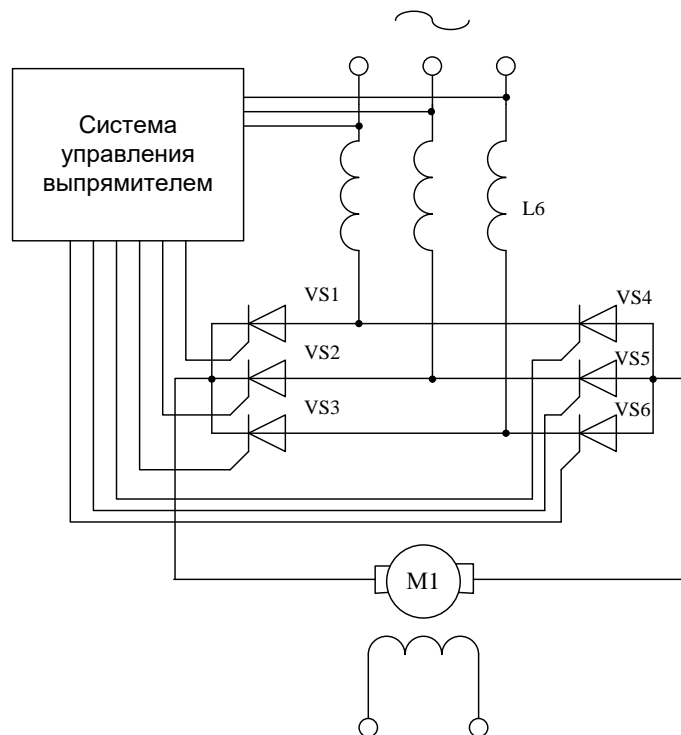


Рисунок 3.9 – Схема 6-ти пульсной ЭМС с электроприводом УВ-ДПТ для исследования режимов генерирования ВГС ШПУ

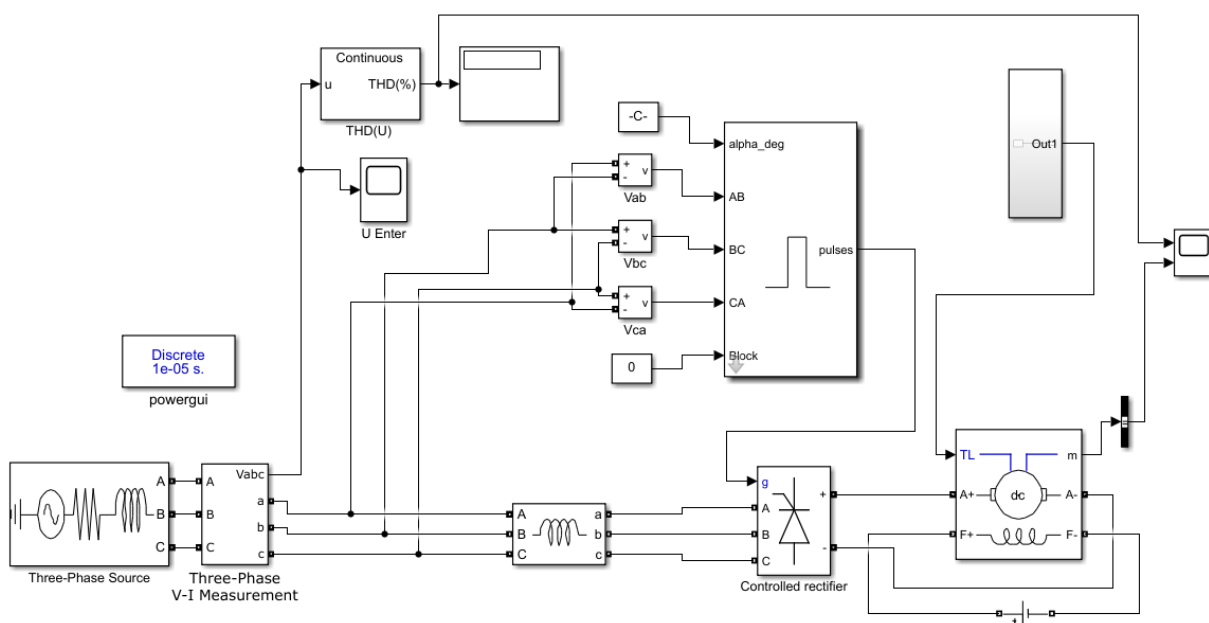


Рисунок 3.10 – Имитационная модель для исследования режимов генерирования ВГС в ЭМС с электроприводом УВ-ДПТ (6-ти пульсная схема управления)

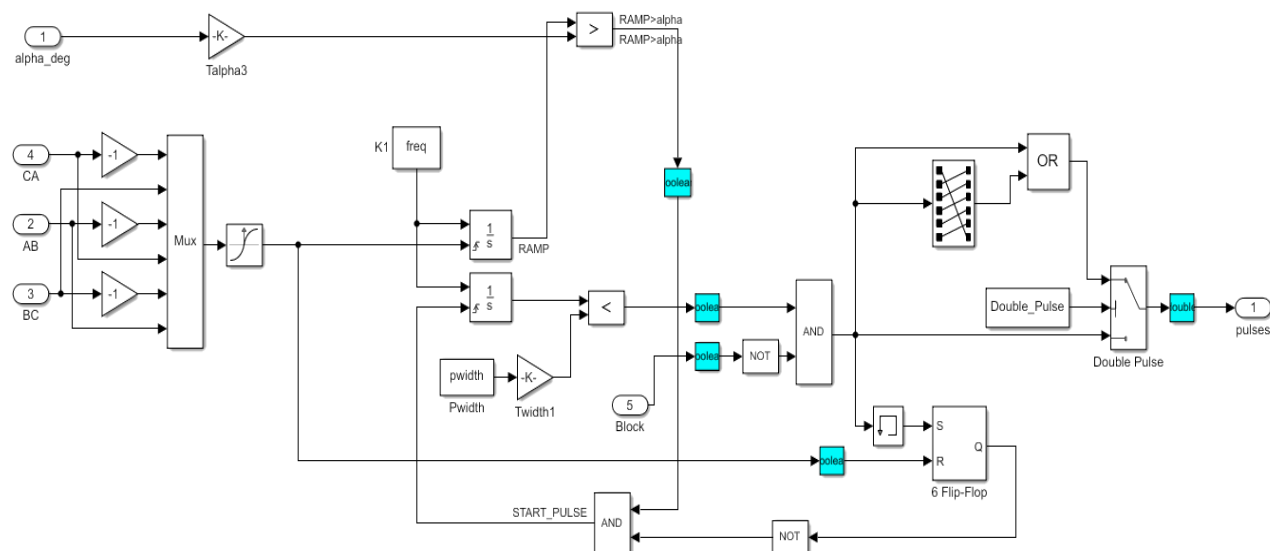


Рисунок 3.11 – Подсистема управления выпрямителем электропривода
УВ-ДПТ для исследования режимов генерирования ВГС

В качестве примера на рис. 3.12, 3.13 приведены результаты моделирования режима генерирования ВГС в ЭМС ШПУ в виде осциллограмм с коэффициентом гармонических составляющих напряжения (K_U), момента (M) и скорости вращения вала двигателя (V), а также синусоиды напряжения с искажениями и гармонического состава.

В результате имитационного моделирования определены пиковые и установившиеся значения суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения K_U при различных углах управления выпрямителем α в диапазоне от 0^0 до 80^0 . Результаты моделирования приведены в табл. 3.2 (рис. 3.14).

Для оценки суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения K_U в зависимости от угла управления выпрямителем α установлены эмпирические зависимости в виде полиномов второй степени:

$$K_U = 7,899 + 0,278*\alpha - 0,002*\alpha^2; \quad (3.1)$$

- для установившегося значения

$$K_U = 4,514 + 0,231*\alpha - 0,002*\alpha^2. \quad (3.2)$$

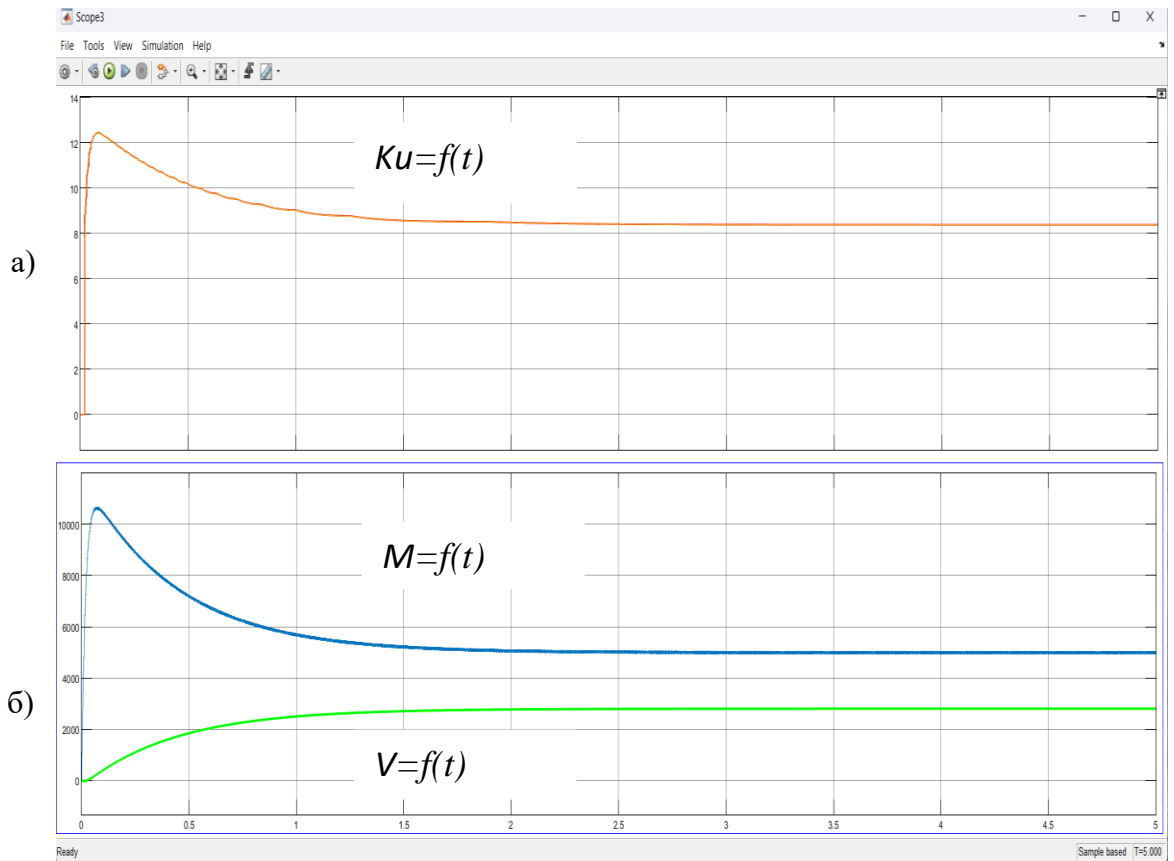


Рисунок 3.12 – Осциллограммы суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения K_U (а), момента M и скорости вращения вала двигателя V (б) ЭМС с электроприводом УВ-ДПТ (6-ти пульсная схема)

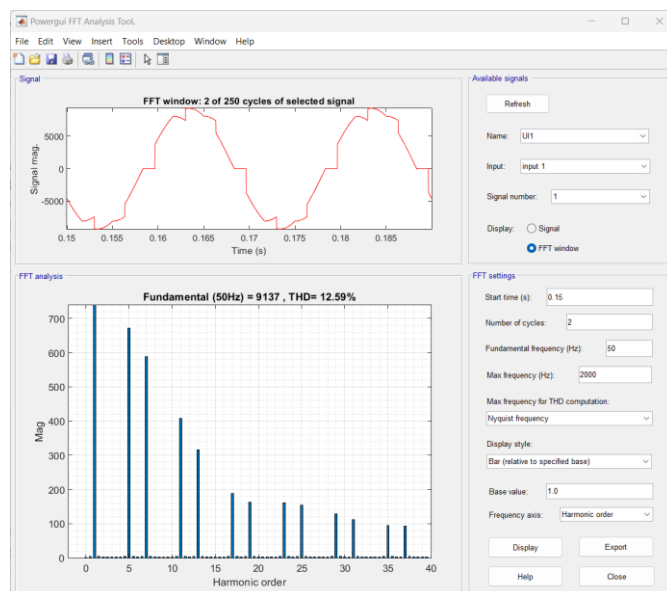


Рисунок 3.13 – Синусоида напряжения с искажениями, гармонический состав и суммарный коэффициент гармонических составляющих в 6-ти пульсной схеме ЭМС с электроприводом УВ-ДПТ

Таблица 3.2 – Зависимости суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) от углов управления выпрямителем α

α угол управления выпрямителем, $^\circ$	K_U , пиковое значение, %	K_U , установившиеся значение, %
0	8,4	4,8
5	9	5,4
10	10,1	6,4
15	11,3	7,4
20	12,6	8,4
25	13,4	9,2
30	14,2	10
35	14,6	10,7
40	15,1	11,4
45	15,2	11,5
50	15,4	11,6
55	15,8	11,7
60	16,1	11,7
65	16,1	11,7
70	15,6	11,9
75	14,9	12
80	14,1	12,1

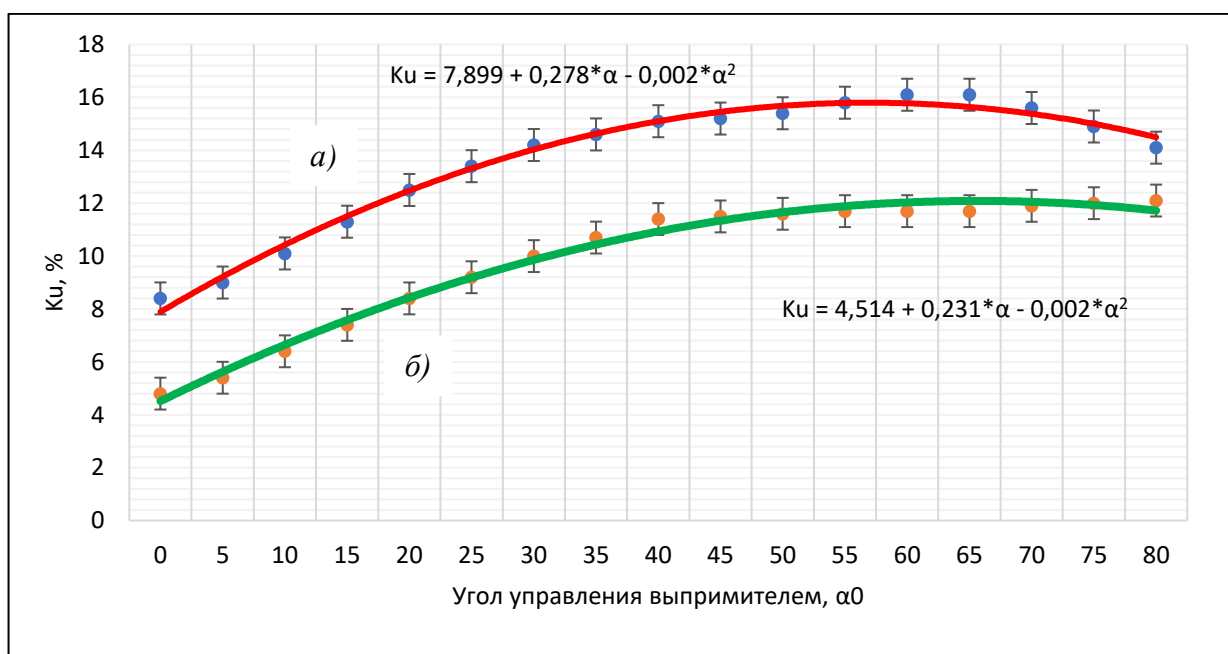


Рисунок 3.14 – Зависимости суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) в 6-ти импульсной схеме ЭМС с электроприводом УВ-ДПТ от угла управления выпрямителем α : пиковое значение (a); установившееся значение (б)

Зависимости (3.1) и (3.2) характеризуются очень высокой точностью средней ошибки аппроксимации по шкале Чеддока находящиеся в диапазоне ($0\% < \bar{A} < 10\%$):

$$- \text{ для пикового значения } K_U \bar{A} = 1,77 \% ; \quad (3.3)$$

$$- \text{ для установившееся значения } K_U \bar{A} = 2,32 \% . \quad (3.4)$$

Пиковое и установившееся значения K_U находятся в диапазонах соответственно (8,4 – 16,1 %) и (4,8 – 12,1 %), что выше, чем требуемое значение по ГОСТ 32144 – 2013.

Имитационная модель для исследования генерирования режимов ВГС в ЭМС с электроприводом УВ-ДПТ при семипериодной тахограмме движения подъемных сосудов ШПУ приведена на рис. 3.15.

В модель входят: трехфазный источник переменного напряжения; трехфазный универсальный измеритель напряжения; измеритель суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения; вводной дроссель; подсистема, имитирующая механическую часть подъемной установки; трехфазный управляемый выпрямитель; подсистема управления выпрямителем; двигатель постоянного тока с независимым возбуждением; источник постоянного тока для питания индуктора двигателя постоянного тока; осциллографы для визуализации результатов имитационного моделирования; подсистема, которая формирует семипериодную тахограмму движения подъемных сосудов ШПУ.

Функция блока для формирования семипериодной тахограммы движения подъемных сосудов шахтной подъемной установки имеет вид:

$$\begin{aligned} dV = a * dt = & (u > 0) * 0.36 * (u < 1.3) + (u > 1.3) * 0 * (u < 11.2) + \\ & (u > 11.2) * 0.46 * (u < 30.3) + (u > 30.3) * 0 * (u < 97.6) + \\ & (u > 97.6) * (0.74) * (u < 109.6) + (u > 109.6) * 0 * (u < 127.6) + \\ & (u > 127.6) * (0.6) * (u < 128.2) + (u > 128.2) * 0 * (u < 130). \end{aligned} \quad (3.5)$$

В качестве примера на рис. 3.16 - 3.18 приведены результаты моделирования режима генерирования ВГС в ЭМС ШПУ с электроприводом УВ-ДПТ при семипериодной тахограмме движения подъемных сосудов.

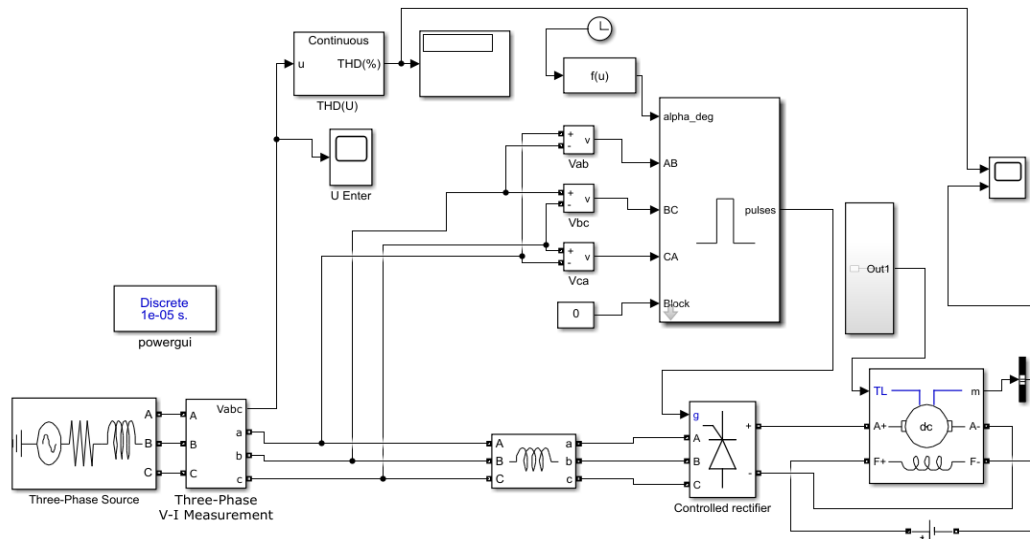


Рисунок 3.15 – Имитационная модель для исследования генерирования ВГС в ЭМС с электроприводом УВ-ДПТ при семипериодной тахограмме движения подъемных сосудов ШПУ

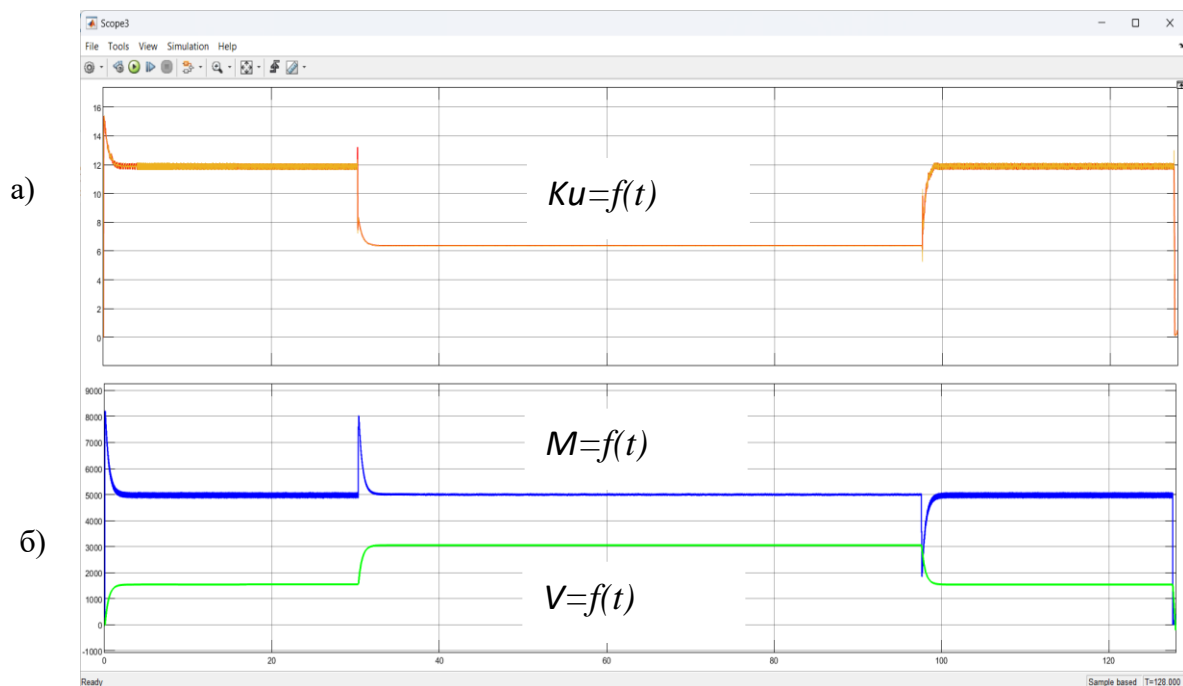


Рисунок 3.16 – Осциллограммы в ЭМС с электроприводом УВ-ДПТ (6-ти пульсная схема) при семипериодной тахограмме движения подъемных сосудов ШПУ: а) $Ku=f(t)$; б) $M=f(t)$; $V=f(t)$.

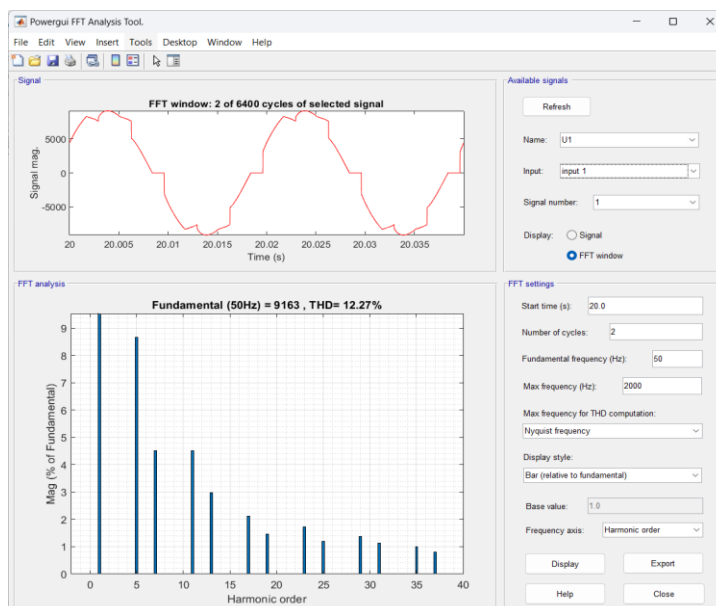


Рисунок 3.17 - Синусоида напряжения с искажениями, гармонический состав и суммарный коэффициент гармонических составляющих в ЭМС с электроприводом УВ-ДПТ при семипериодной тахограмме движения подъемных сосудов ШПУ с низкой скоростью по разгрузочным кривым

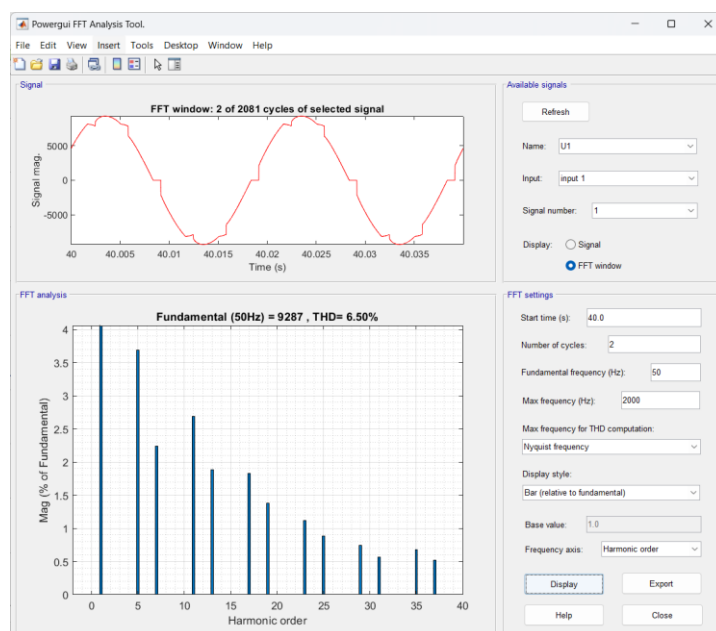


Рисунок 3.18 - Синусоида напряжения с искажениями, гармонический состав и суммарный коэффициент гармонических составляющих в ЭМС с электроприводом УВ-ДПТ при семипериодной тахограмме движения подъемных сосудов ШПУ с высокой скоростью

На осциллограммах приведены: суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения $K_U = f(t)$ (рис. 3.16а); момент на валу двигателя $M = f(t)$ и скорость вращения вала двигателя $V = f(t)$ (рис. 3.16б).

На рис. 3.17 приведены результаты моделирования режима генерирования ВГС в ЭМС с электроприводом УВ-ДПТ при движении подъемного сосуда с низкой скоростью в разгрузочных кривых ШПУ (время движения $t=20$ с): K_U составляет – 12,27 %, амплитудное значение напряжения питания - 9163 В.

На рис. 3.18 приведены результаты моделирования режима генерирования ВГС в ЭМС с электроприводом УВ-ДПТ при движении подъемного сосуда с высокой установившейся скоростью вращения двигателя (время движения $t=40$ с): K_U составляет – 6,5 %, амплитудное значение напряжения питания - 9287 В.

Результаты моделирования режима генерирования ВГС показывают, что суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения K_U в ЭМС ШПУ с электроприводом УВ-ДПТ имеет значения, превышающие требования ГОСТ 32144-2013.

3.4.2 Исследование режимов генерирования

высших гармонических составляющих электроприводами с системой
«Преобразователь частоты – асинхронный двигатель»

Исследование режимов генерирования ВГС электроприводами с системой ПЧ-АД проведено с применением имитационного моделирования в соответствии с «Методикой имитационного моделирования режимов генерирования ВГС в ЭМС и ЭТС угольных шахт» приведенной в (п. 3.3).

Схема ЭМС с электроприводом ПЧ - АД для исследования генерирования ВГС, включающая двухзвенный преобразователь частоты с автономным инвертором напряжения, систему управления автономным инвертором на основе широтно-импульсной модуляции, вводной дроссель, асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, приведена на рис.3.19.

Имитационная модель с 6-ти пульсовой ЭМС ПЧ - АД для исследования режимов генерирования ВГС приведена на рис. 3.20, включает: трехфазный источник переменного напряжения; трехфазный универсальный измеритель напряжения; измеритель суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения; входной дроссель; трехфазный неуправляемый выпрямитель; трехфазный автономный инвертор напряжения; подсистема управления автономным инвертором (рис. 3.21); емкостной фильтр; асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором; конденсатор; блок дополнительных измерительных параметров.

В качестве примера на рис. 3.22, 3.23 приведены результаты моделирования режима генерирования ВГС на вводе электропотребителя с нелинейной нагрузкой. На осциллограммах приведены: суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения по фазам $K_{UA} = f(t)$, $K_{UB} = f(t)$, $K_{UC} = f(t)$ (рис. 3.22). График синусоиды напряжения с искажениями, гармонический состав электропотребителя с нелинейной нагрузкой и суммарный коэффициент гармонических составляющих приведены на рис. 3.23.

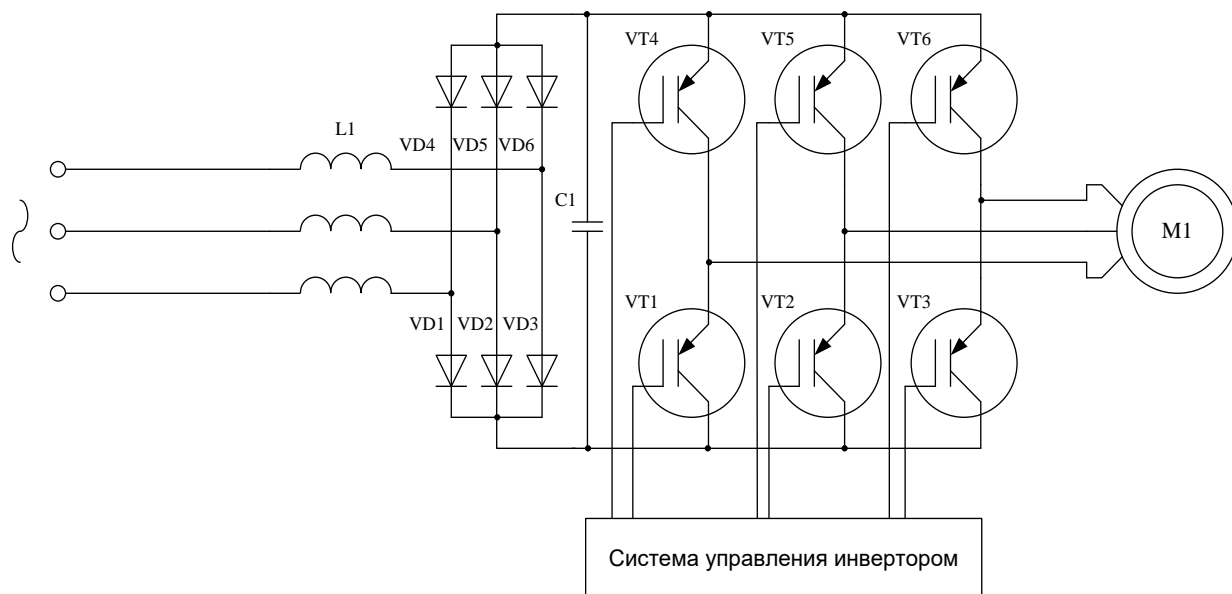


Рисунок 3.19 - Схема 6-ти пульсной ЭМС с электроприводом ПЧ - АД для исследования режимов генерирования ВГС

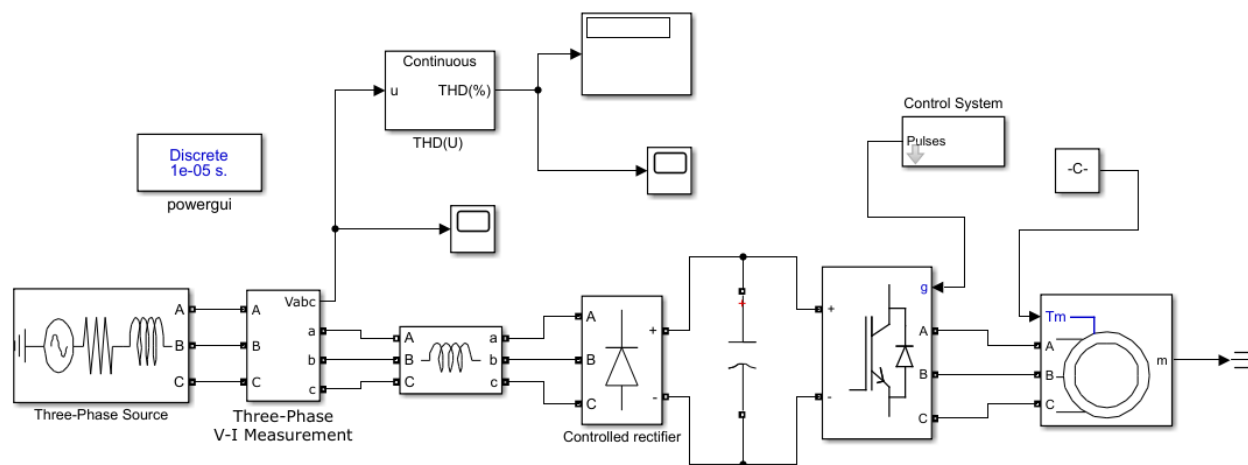


Рисунок 3.20 – Имитационная модель 6-ти пульсной ЭМС ПЧ - АД для исследования режимов генерирования ВГС

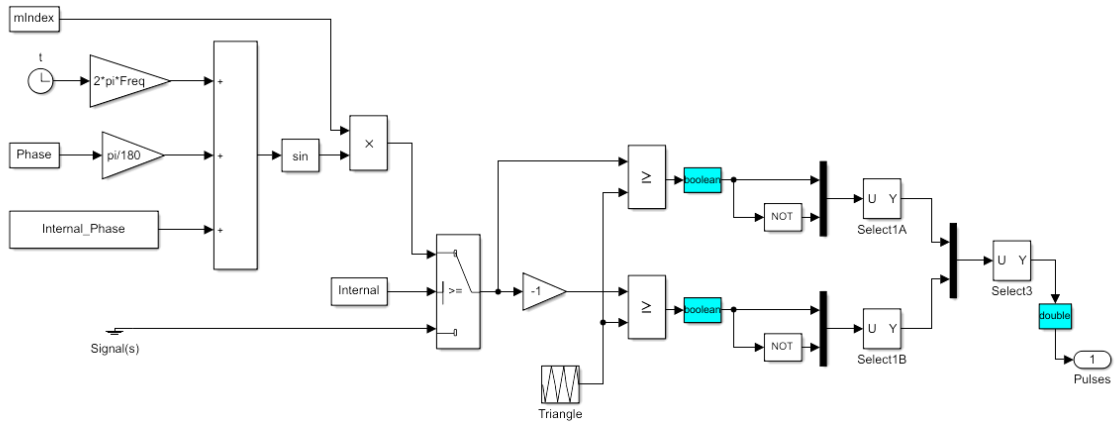


Рисунок 3.21 – Подсистема управления АИН
 ЭМС с электроприводом ПЧ-АД
 для исследования режимов генерирования ВГС

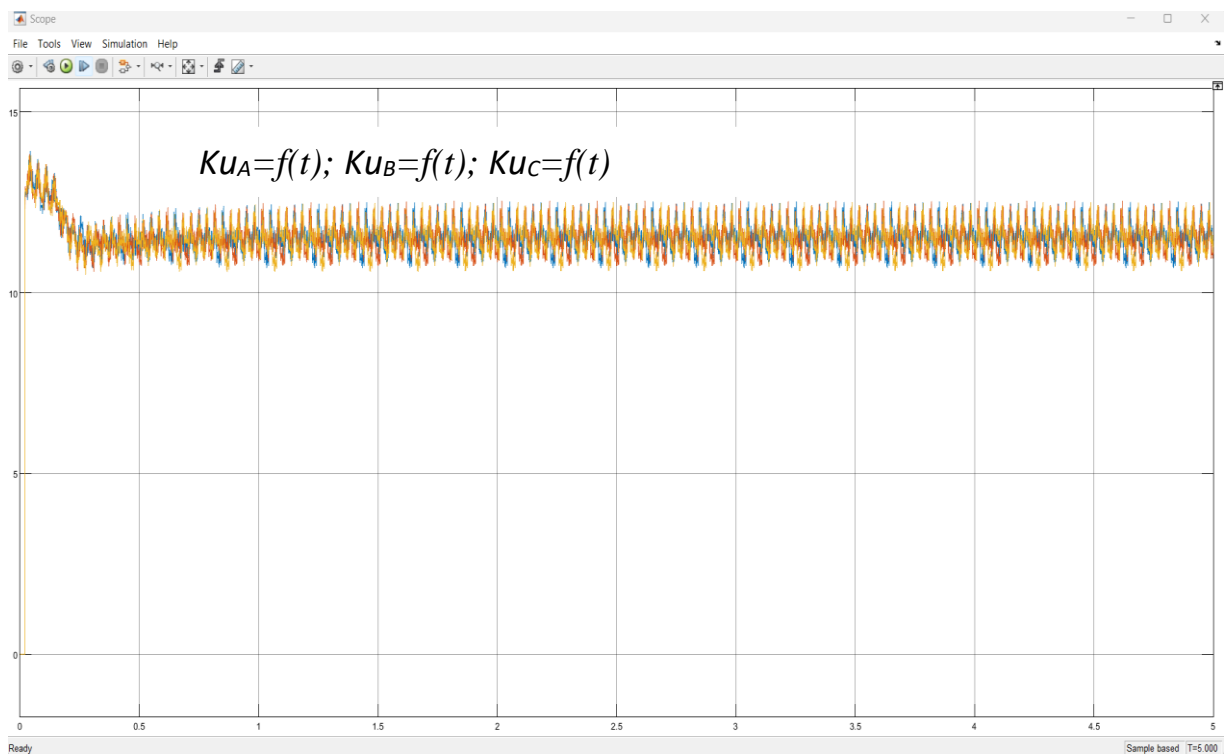


Рисунок 3.22 – Осциллограммы суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения K_U ЭМС с электроприводом ПЧ – АД

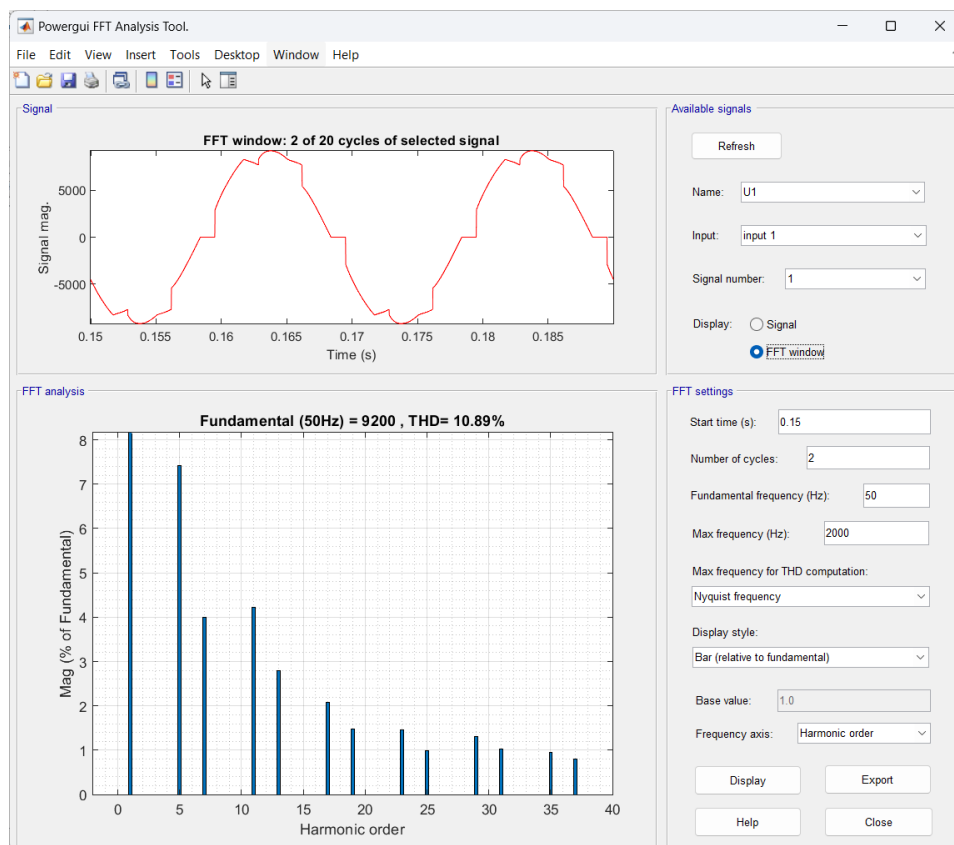


Рисунок 3.23 – Синусоида напряжения с искажениями, гармонический состав и суммарный коэффициент гармонических составляющих в 6-ти пульсной схеме ЭМС с электроприводом ПЧ – АД

Результаты моделирования показали: суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжению K_U равен 10,89 %; амплитудное значение питающей напряжения равное 9200 В; частота сети равна 50 Гц.

В результате имитационного моделирования определены установившиеся значения суммарного коэффициента высших гармонических составляющих напряжения K_U , находящийся в диапазоне от 5 до 50 Гц для различных значений выходной частоты $f_{вых}$ автономного инвертора напряжения. Результаты моделирования приведены в табл. 3.3.

Зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения K_U от частоты на выходе автономного инвертора напряжения $f_{вых}$ в 6-ти пульсной схеме ЭМС ПЧ – АД приведена на рис. 3.24.

Таблица 3.3 - Зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения K_U от частоты на выходе автономного инвертора напряжения $f_{вых}$

$K_U, \%$	11,22	11,23	10,89	11,15	10,7	10,75	10,69	10,62	10,25	10,22
$f_{вых}, \text{Гц}$	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50

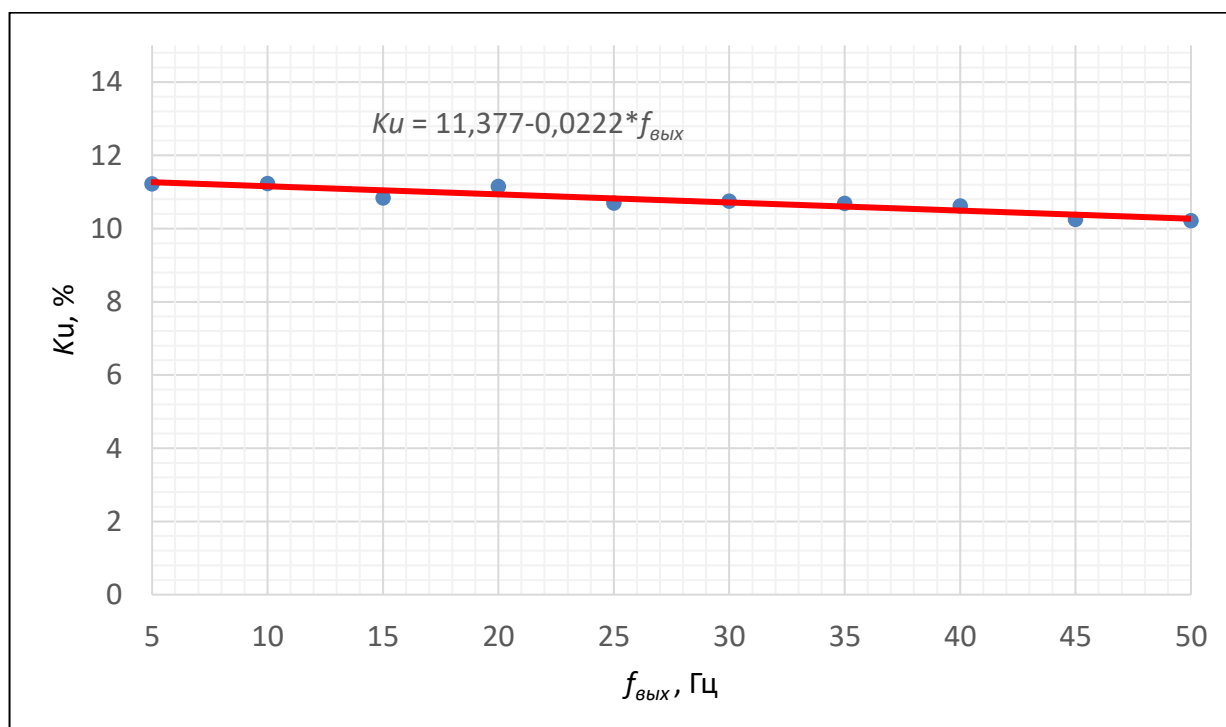


Рисунок 3.24 - Зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения K_U от выходной частоты автономного инвертора напряжения $f_{вых}$ в 6-ти импульсной схеме ЭМС ПЧ – АД

Обработка результатов моделирования с помощью метода аппроксимации переменных позволила получить графическую зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) от выходной частоты автономного инвертора напряжения ($f_{вых}$) (рис.3.24) в виде линейной зависимости описывается выражением:

$$K_U = 11,377 - 0,0222 * f_{вых}. \quad (3.6)$$

Полученные значение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения K_U от частоты на выходе автономного инвертора напряжения $f_{вых}$ позволило сделать заключение об отсутствии влияния режимов работы АИН на генерирование ВГС, так как уровень K_U практически не изменяется, находясь в диапазоне 11,22–10,22 %.

Имитационная модель 6-ти пульсной ЭТС для исследования режимов генерирования ВГС приведена на рис. 3.25, включает: трехфазный источник; трехфазный неуправляемый выпрямитель; активно-индуктивная нагрузка; измерители тока и напряжения; измеритель суммарного значения гармонических составляющих напряжения; осциллографы.

В качестве примера на рис. 3.26, 3.27 приведены результаты моделирования режима генерирования ВГС на вводе электропотребителя с нелинейной нагрузкой.

На осциллограмме приведен: суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения $K_U = f(t)$ (рис. 3.26).

График синусоиды напряжения с искажениями, гармонический состав электропотребителя с нелинейной нагрузкой и суммарный коэффициент гармонических составляющих приведены на рис. 3.27.

Результаты моделирования показали: суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжению K_U равен 12,27 %; амплитудное значение питающей напряжения равно 9163 В; частота сети равна 50 Гц.

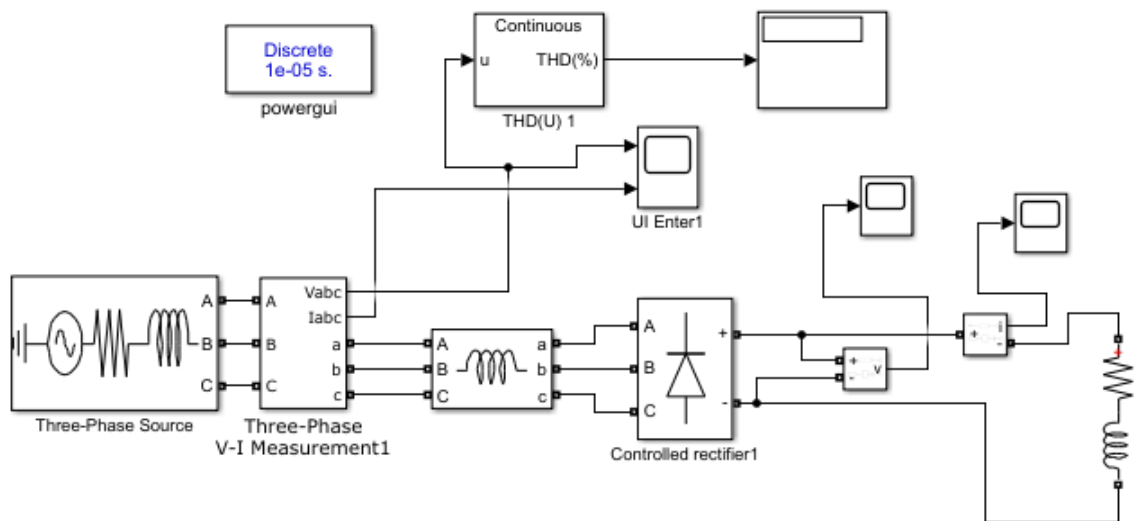


Рисунок 3.25 – Имитационная модель для исследования режимов генерирования ВГС в 6-ти пульсной ЭТС

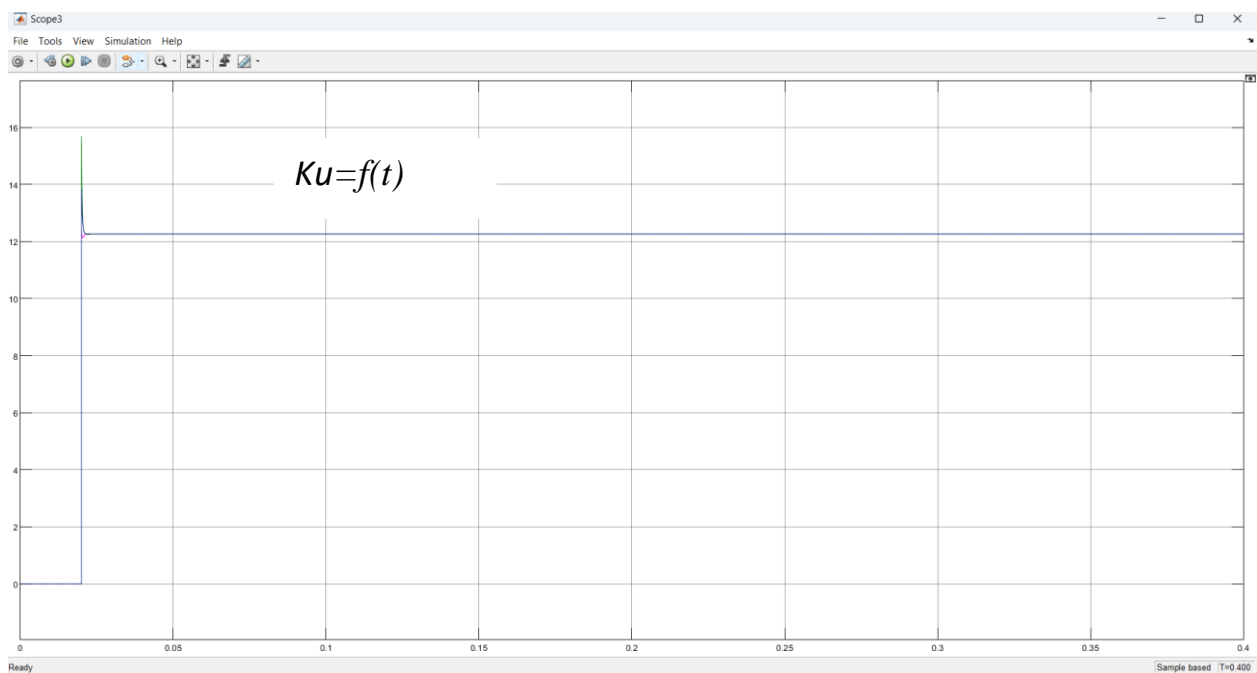


Рисунок 3.26 – Осциллограмма суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения K_U в 6-ти пульсной ЭТС

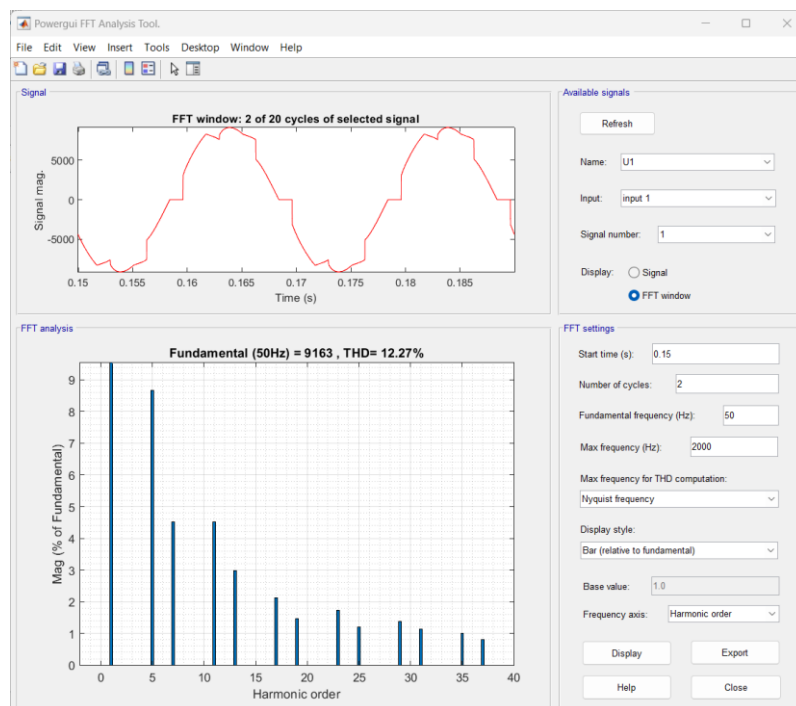


Рисунок 3.27 – Синусоида напряжения с искажениями, гармонический состав и суммарный коэффициент гармонических составляющих в 6-ти пульсной ЭТС

Моделирование режимов генерирования ВГС в 6 - ти пульсных схемах ЭМС и ЭТС позволило сделать заключение о возможности применения разработанной модели 6-ти пульсной ЭТС, приведенной на рис. 3.25, в дальнейших исследованиях режимов генерирования ВГС подземным технологическим оборудованием с электроприводом ПЧ – АД, так как значение K_U в ЭМС, равное 11,22% практически совпадает с K_U в ЭТС, равном 12,27 %. Сходимость результатов составляет ($>0,9$).

Имитационная модель 12-ти пульсной ЭТС для исследования режимов генерирования ВГС приведена на рис. 3.28 включает: трехфазный источник; трехфазный неуправляемый выпрямитель; активно-индуктивная нагрузка; измерители тока и напряжения; измеритель суммарного значения гармонических составляющих напряжения; осциллографы.

В качестве примера на рис. 3.29, 3.30 приведены результаты моделирования режима генерирования ВГС на вводе электропотребителя с нелинейной нагрузкой.

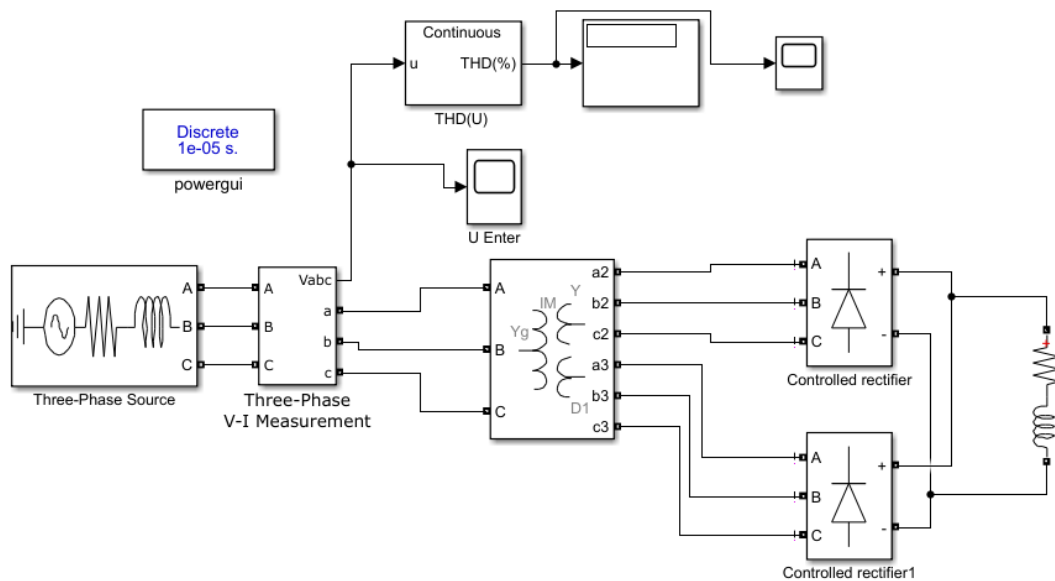


Рисунок 3.28 - Модель 12-ти пульсной ЭТС для исследования режимов генерирования ВГС

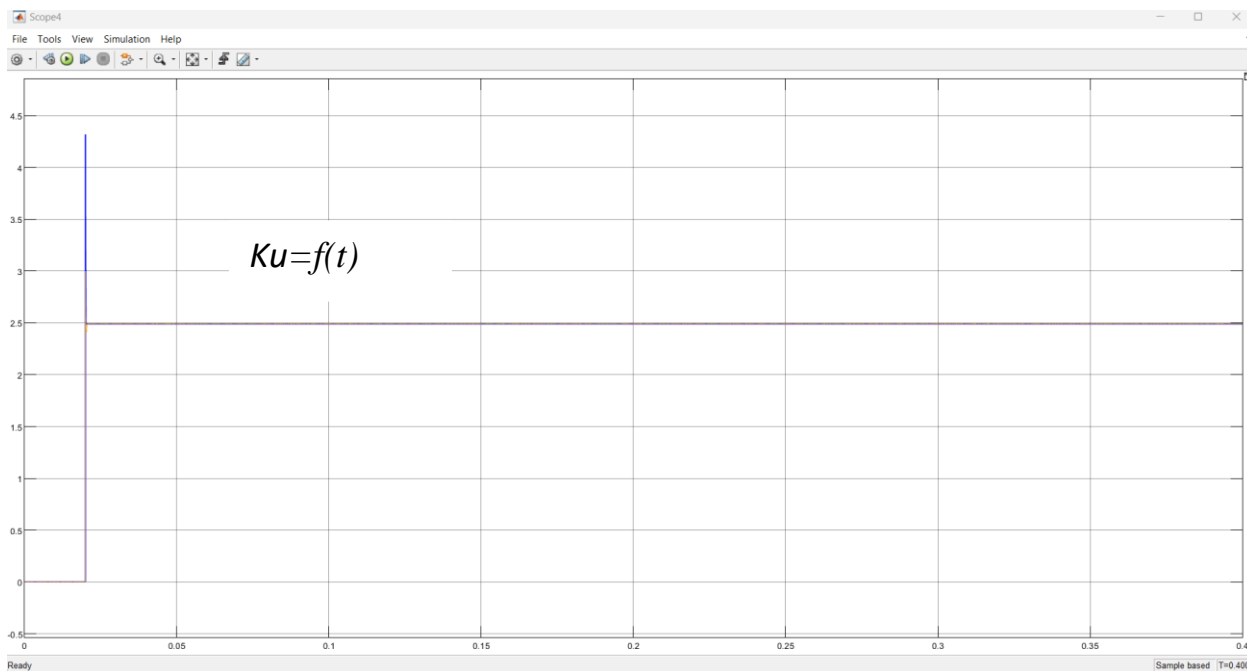


Рисунок 3.29 – Осциллограмма суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения K_U в модели 12-ти пульсной ЭТС

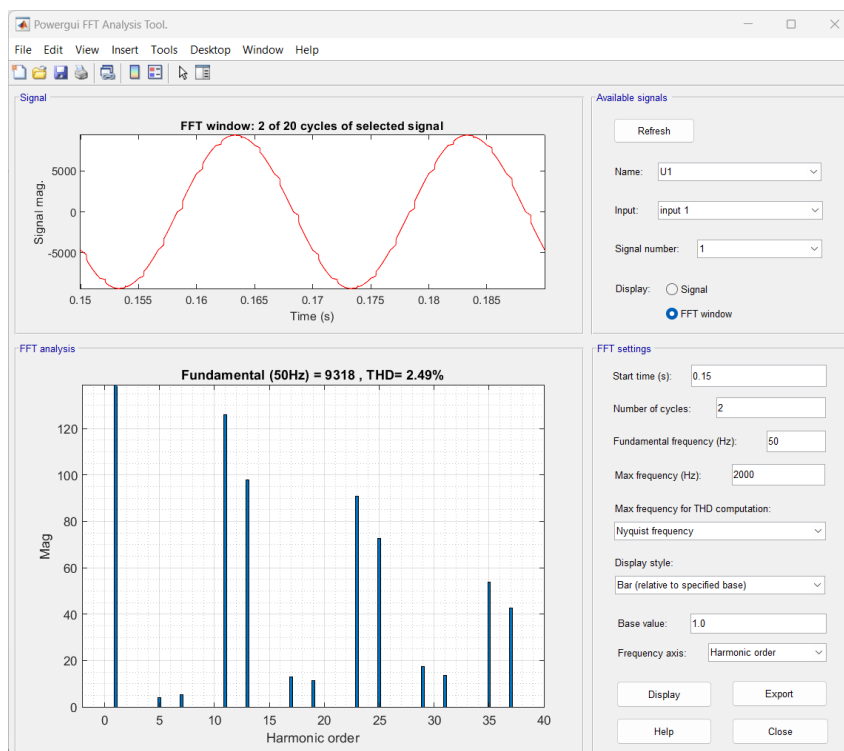


Рисунок 3.30 - Синусоида напряжения с искажениями, гармонический состав и суммарный коэффициент гармонических составляющих в модели 12-ти пульсной ЭТС

На осциллограмме приведен: суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения $K_U = f(t)$ (рис. 3.29).

Синусоида напряжения с искажениями, гармонический состав и суммарный коэффициент гармонических составляющих в модели 12-ти пульсной ЭТС приведены на рис. 3.30.

Результаты моделирования показали: суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения K_U равен 2,49 %; амплитудное значение питающей напряжения равно 9318 В; частота сети равна 50 Гц.

Проведенное моделирование 12-ти пульсной ЭТС позволило сделать заключение об отсутствии необходимости исследования режимов генерирования ВГС, так как значение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения K_U равно 2,49 %, не превосходит требуемое ГОСТ 32144-2013 значение, равное 5 % для электрических сетей напряжением 6 кВ.

3.5 Выводы

1. Установлены 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 ЭМС УВ-ДПТ и ПЧ-АД для исследования режимов генерирования ВГС преобразовательными устройствами систем управления электроприводами технологического оборудования угольных шахт.
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 для исследования режимов генерирования преобразовательными устройствами схем управления электроприводами ПЧ-АД подземного технологического оборудования, так как значение K_U в ЭМС, равное 11,22 %, практически совпадает с K_U в ЭТС, равного 12,27 %.
6. Установлено, что имеется возможность не выполнять исследование генерирования ВГС в ЭТС с 12-ти пульсной схемой выпрямления системы управления электроприводом так как установлено значение K_U равное 2,49 %, при требуемом значении ГОСТ 32144-2013, равном 5 %.

Глава 4. Исследование режимов генерирования высших гармонических составляющих в подземных участковых электротехнических системах угольных шахт с обоснованием параметров и применением фильтрокомпенсирующих устройств

4.1 Электротехнические системы выемочных и проходческих участков для исследования режимов генерирования высших гармонических составляющих

4.1.1 Электротехнические системы выемочных участков для исследования режимов генерирования высших гармонических составляющих

В подземном комплексе угольных шахт схемы электроснабжения работают с изолированным режимом нейтрали.

На основании обследования технологических схем 20-ти выемочных участков угольных шахт проведена классификация их схем электроснабжения по типу энергопоезда, питающей участковые электроприемники. На обследуемых шахтах применяются два вида схем электроснабжения выемочных участков по типу энергопоезда: сосредоточенному (рис. 4.1) и распределенному (рис. 4.2).

Распределение схем электроснабжения обследованных выемочных участков по типу энергопоездов приведено в табл. 4.1.

Таблица 4.1 - Распределение схем электроснабжения участков угольных шахт по типу энергопоездов

Схема электроснабжения выемочного участка со сосредоточенным энергопоездом	95%
Схема электроснабжения выемочного участка с распределенным энергопоездом	5%

Данные табл. 4.1 показывают, что схема электроснабжения выемочного участка со сосредоточенным энергопоездом применяется на 95-ти процентах шахт.

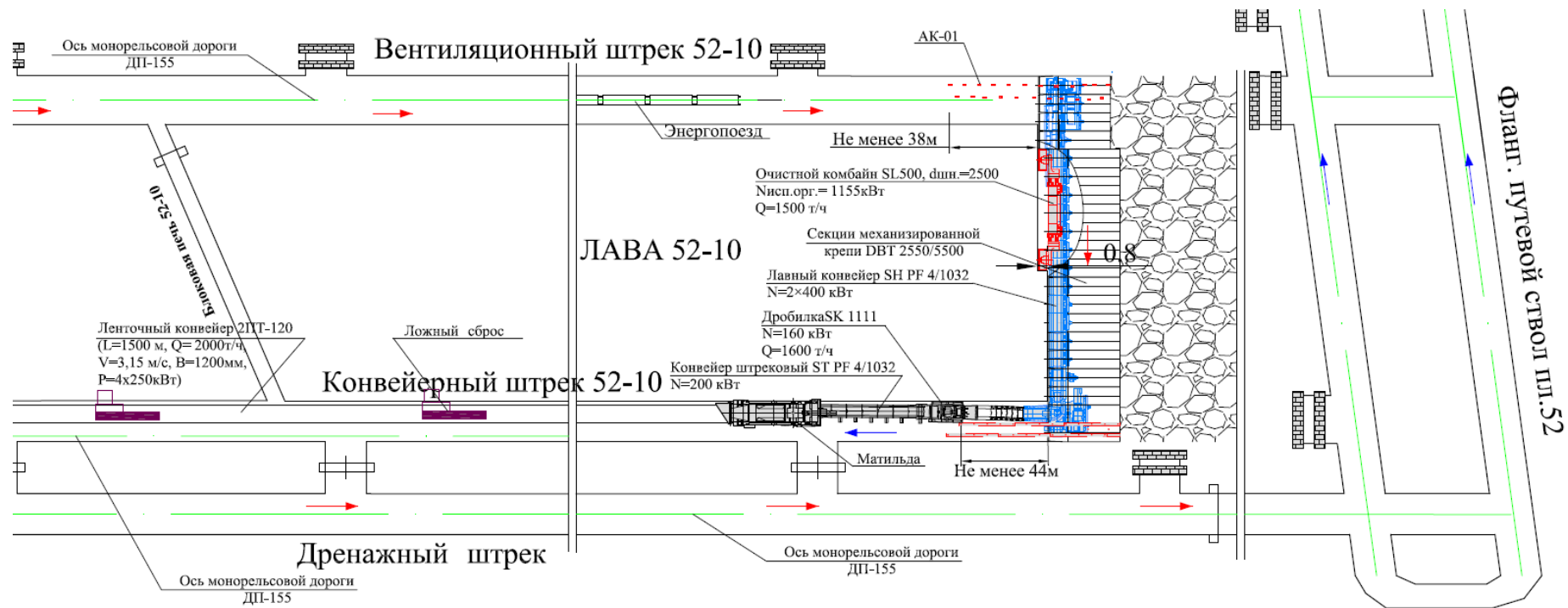


Рисунок 4.1 – Технологическая схема выемочного участка с применением
сосредоточенного энергопоезда

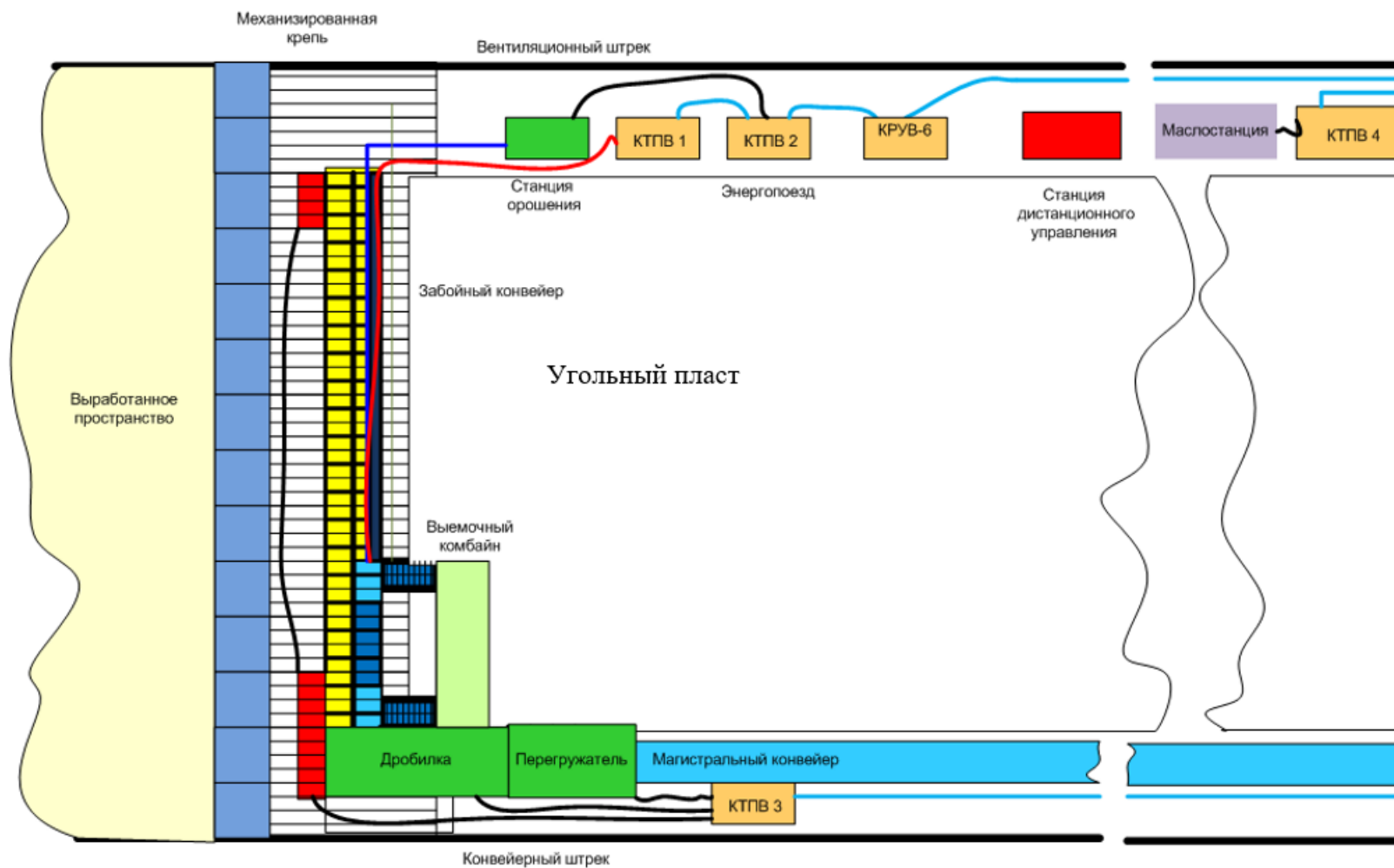


Рисунок 4.2 - Технологическая схема выемочного участка с применением распределенного энергопоезда

Схема электроснабжения выемочного участка со сосредоточенным энергопоездом состоит из понизительных подстанций, кабельных линий и коммутационных аппаратов, которые располагаются в одном месте, как правило на вентиляционном штреке.

Схема электроснабжения выемочного участка с распределенным энергопоездом состоит из понизительных подстанций, кабельных линий и коммутационных аппаратов, часть из которых располагаются на вентиляционном штреке, а часть на конвейерном.

Совокупность схемы электроснабжения и электроприемников представляется как ЭТС выемочного участка. В дальнейших исследованиях при формировании имитационных моделей для исследования режимов генерирования ВГС принята ЭТС выемочного участка с применением сосредоточенного энергопоезда, которая имеет наибольшее распространение на угольных шахтах.

ЭТС выемочного участка со сосредоточенным энергопоездом, расположенным на вентиляционном штреке, включает: понизительные подстанции напряжением 6/3,3 кВ и 6/1,14 кВ; кабельные линии; высоковольтные и низковольтные коммутационные аппараты; механизированный комплекс. В состав механизированного комплекса входит: механизированная крепь; выемочный комбайн; забойный конвейер; дробилка; перегружатель. В состав энергопоезда может включаться станция дистанционного управления, обеспечивающая контроль, связь и управление технологическим оборудованием.

Структурная схема ЭТС выемочного участка со сосредоточенным энергопоездом приведена на рис. 4.3. Электроэнергия трехфазного напряжения 6 кВ подводится по кабельным линиям от ЦПП к вводной ячейке КРУВ-6 энергопоезда, состоящего из трех понизительных подстанций 6/3,3 кВ и двух 6/1,14 кВ служащих для электропитания выемочного комбайна, забойного конвейера, дробилки, перегружателя и станции орошения. В схему входит аппарат осветительный шахтный (АОШ 1,14/0,22),

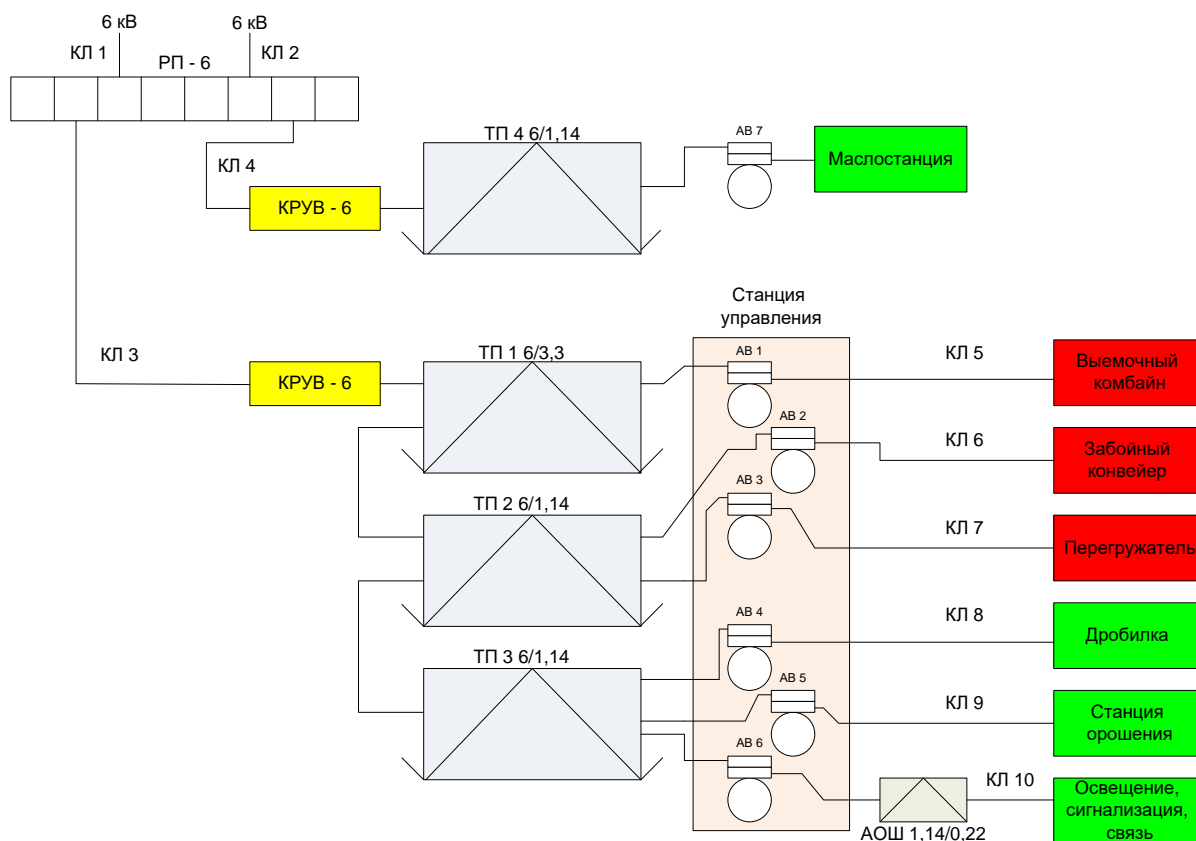


Рисунок 4.3 – Структурная схема ЭТС выемочного участка со средоточенным энергопоездом

в состав которого входит трансформатор, преобразующий первичное напряжение 1,14 кВ во вторичное напряжение 0,22 кВ, для электропитания осветительных сетей, систем сигнализации и защиты, а также систем телеметрии и связи. Коммутация аппаратуры проводится на станции управления.

В состав ЭТС выемочного участка входит также маслостанция механизированной крепи, которая получает электропитание от отдельной ячейки ЦПП к вводной КРУВ-6 подстанции маслостанции.

На основе приведенной на рис. 4.3 ЭТС, в дальнейшем разработаны имитационные модели для исследования режимов генерирования ВГС в подземных электрических сетях выемочных участков.

4.1.2 Электротехнические системы проходческих участков для исследования режимов генерирования высших гармонических составляющих

На основании обследования технологических схем 47-ми проходческих участков угольных шахт выполнен анализ распределения по вариантам ведения подготовительных работ, приведенное в табл. 4.2.

На обследуемых шахтах применяется три варианта технологических схем проведения подготовительных работ: вариант 1 – схема подготовительных работ включающая: проходческий комбайн - ленточный перегружатель – ленточный конвейер – скребковый конвейер - ленточный конвейер (рис. 4.4); вариант 2 –схема подготовительных работ включающая: проходческий комбайн – скребковый конвейер №1 – скребковый конвейер №2 – скребковый конвейер №3 (рис. 4.5); вариант 3 – схема подготовительных работ включающая: проходческий комбайн – самоходный вагон (челночная вагонетка) – бункер перегружатель – ленточный конвейер (рис. 4.6).

По результатам распределения (табл. 4.2) установлена наиболее распространенная технологическая схема по варианту 1 (проходческий комбайн - ленточный перегружатель – ленточный конвейер – скребковый конвейер - ленточный конвейер), доля которой составляет 42,55%.

Совокупность схемы электроснабжения и электроприемников представляется как ЭТС проходческого участка. Структурная схема ЭТС проходческого участка по варианту 1 приведена на рис. 4.7.

Таблица 4.2 - Распределение технологических схем проходческих участков

Технологическая схема	Число участков	Доля, %
Вариант 1	20	42,55
Вариант 2	18	38,30
Вариант 3	9	19,15
	47	100,00

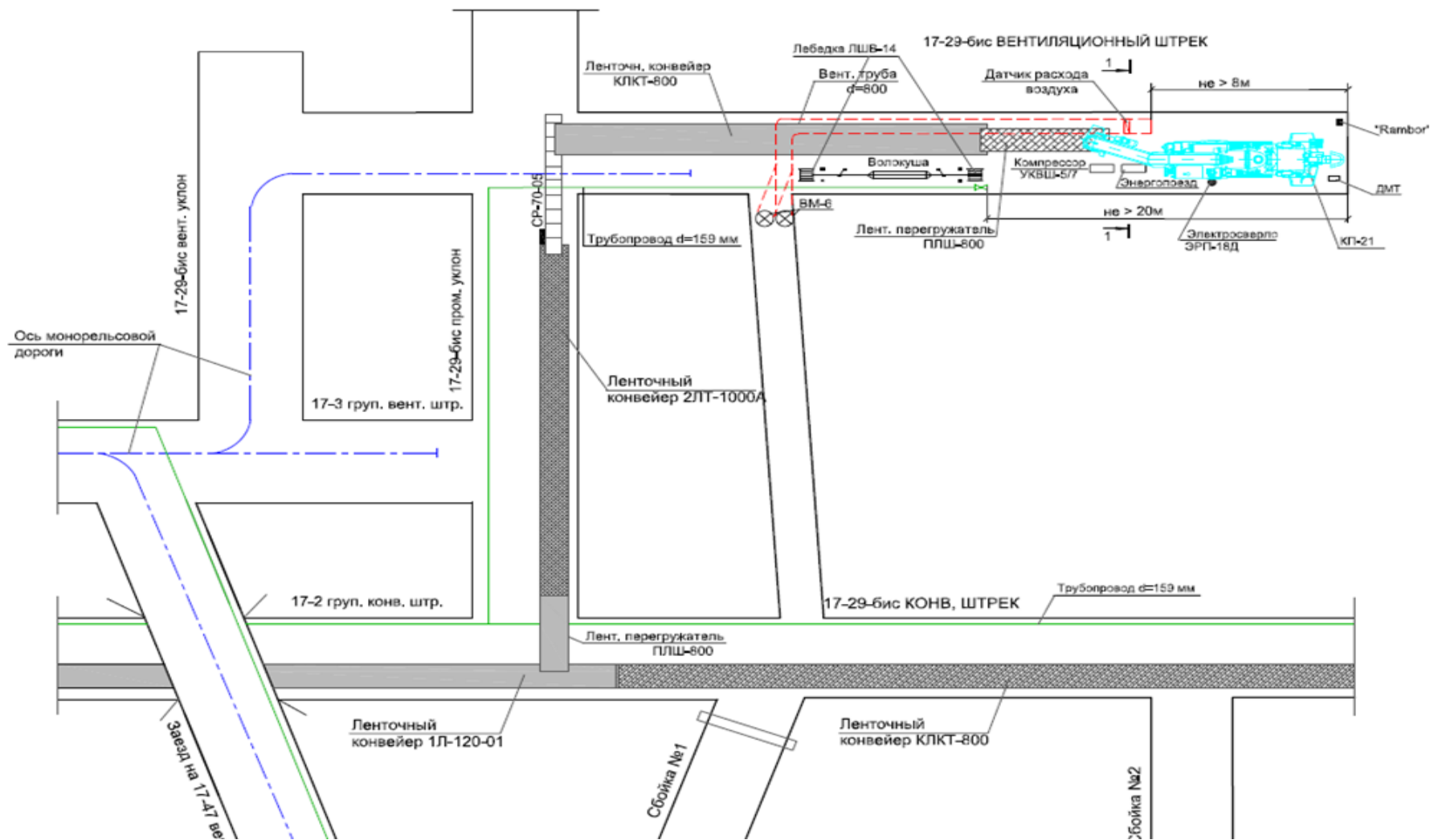


Рисунок 4.4 - Технологическая схема подготовительных работ по первому варианту, включающая: проходческий комбайн, ленточный перегружатель, ленточный конвейер, скребковый конвейер, ленточный конвейер

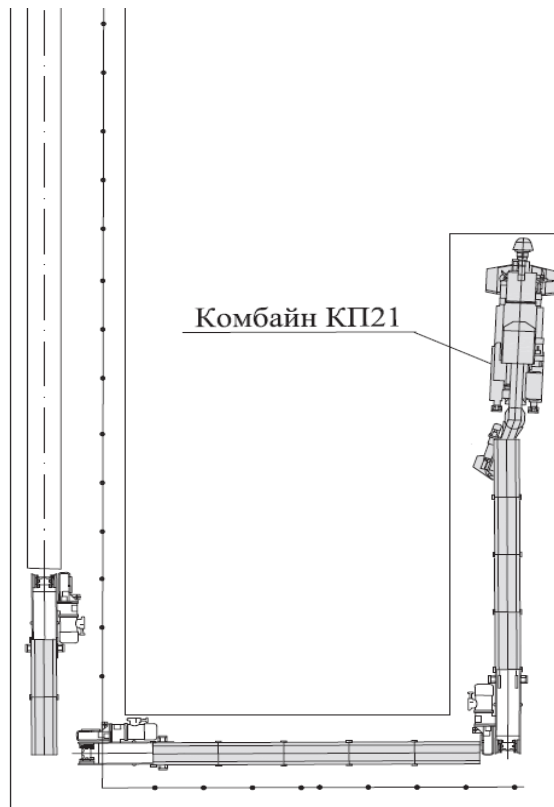


Рисунок 4.5 - Технологическая схема подготовительных работ по второму варианту, включающая: проходческий комбайн, скребковый конвейер, скребковый конвейер, скребковый конвейер

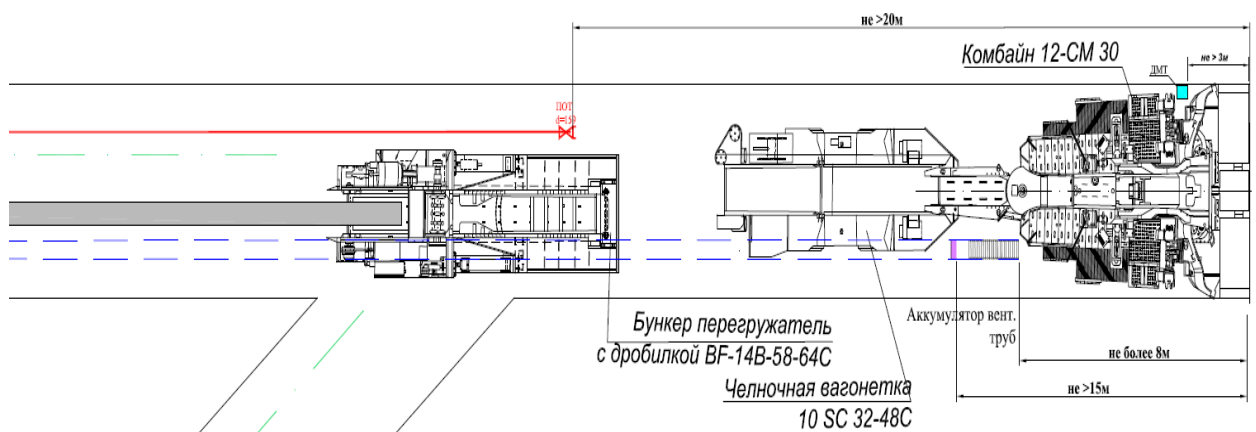


Рисунок 4.6 - Технологическая схема подготовительных работ по третьему варианту, включающая: проходческий комбайн, самоходный вагон (челночная вагонетка), бункер перегружатель, ленточный конвейер

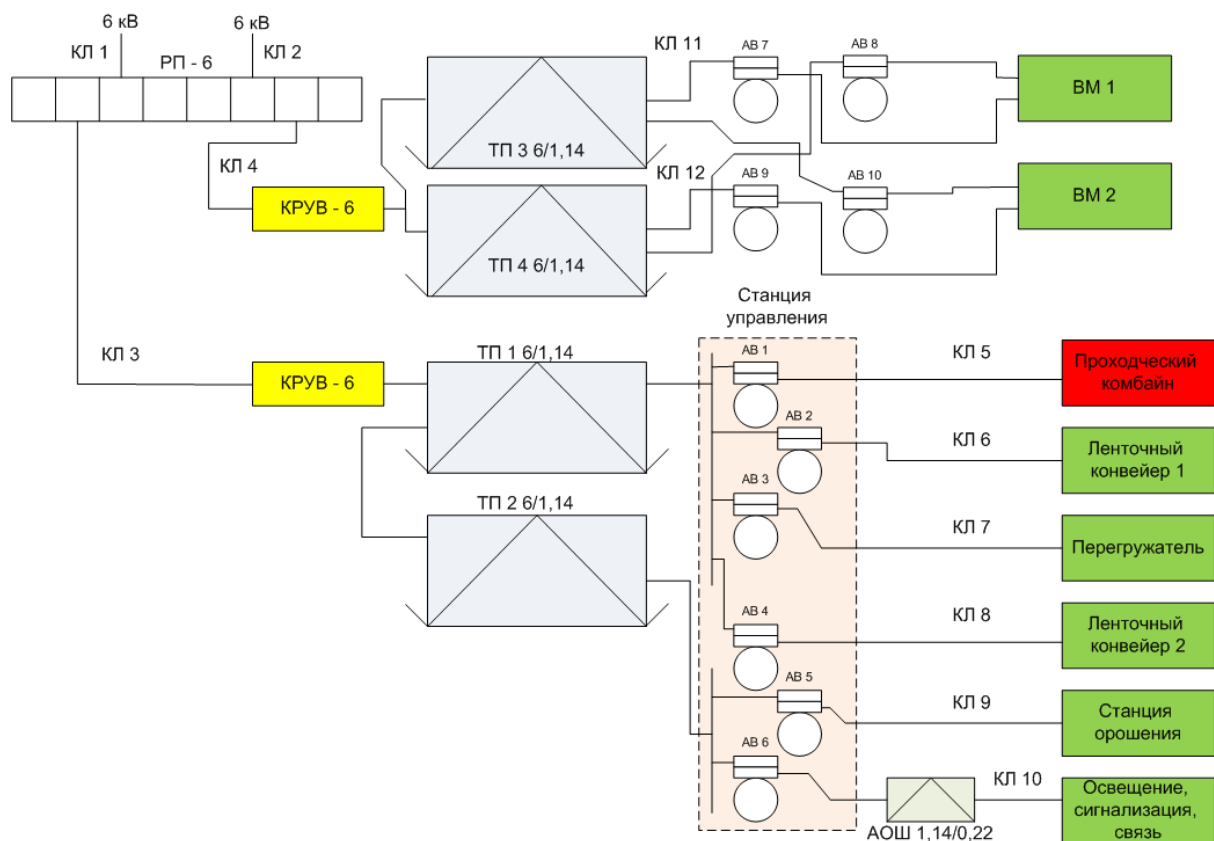


Рисунок 4.7 – Структурная схема ЭТС проходческого участка угольной шахты

ЭТС проходческого участка включает: энергопоезд, в состав которого входят: четыре понизительные подстанции 6/1,14 кВ, служащие для электропитания проходческого комбайна, ленточного конвейера №1, ленточного перегружателя, ленточного конвейера №2; станции орошения; вентиляторов местного проветривания (ВМ 1, ВМ 2); кабельные линии; высоковольтные и низковольтные коммутационные аппараты для управления технологическим оборудованием; аппарат осветительный шахтный (АОШ 1,14/0,22) для электропитания осветительных сетей, систем сигнализации и защиты, а также систем телеметрии и связи.

На основе ЭТС, приведенной на рис. 4.7 в дальнейшем будут разработаны имитационные модели для исследования режимов генерирования ВГС в подземных электрических сетях проходческих участков.

4.2 Исследование режимов генерирования высших гармонических составляющих в подземных участковых электротехнических системах

4.2.1 Исследование режимов генерирования высших гармонических составляющих в электрических сетях выемочного участка

Исследование режимов генерирования ВГС в электрических сетях выемочного участка проведено в соответствии с Методикой имитационного моделирования режимов генерирования ВГС в ЭТС угольных шахт (п.3.3).

Имитационная модель ЭТС выемочного участка для исследования режимов генерирования ВГС, приведенная на рис. 4.8, состоит из: источника напряжения; участковых понизительных подстанций энергопоезда; кабельных линий; измерительных приборов и осциллографов; коммутационных аппаратов, подсистем (рис. 4.9), имитирующих электропотребление выемочного комбайна, забойного конвейера, дробилки, перегружателя, станции орошения, системы освещения, маслостанции крепи.

Моделирование режимов генерирования ВГС проведено для диапазонов изменения электротехнических показателей электроприемников выемочного участка, приведенных в табл. 4.3. В Приложении 4, табл. П.4.1–П.4.6 приведена техническая характеристика электроприемников выемочного участка.

Таблица 4.3 – Диапазоны изменения электротехнических показателей электроприемников выемочного участка при моделировании режимов ВГС

Электроприемники генерирующие ВГС	Диапазоны изменения электротехнических показателей			
	Напряжение, кВ	Суммарная мощность, кВт	Мощность регулируемого электропривода, кВт	Мощность нерегулируемого электропривода, кВт
Выемочный комбайн	1,14; 3,3; 4,16	124–1136	20–120 кВт	104–1016
Забойный конвейер	1,14; 3,3	350 - 3600	100–1100	250–2500
Перегружатель	1,14; 3.3	200 - 525	200 - 525	0

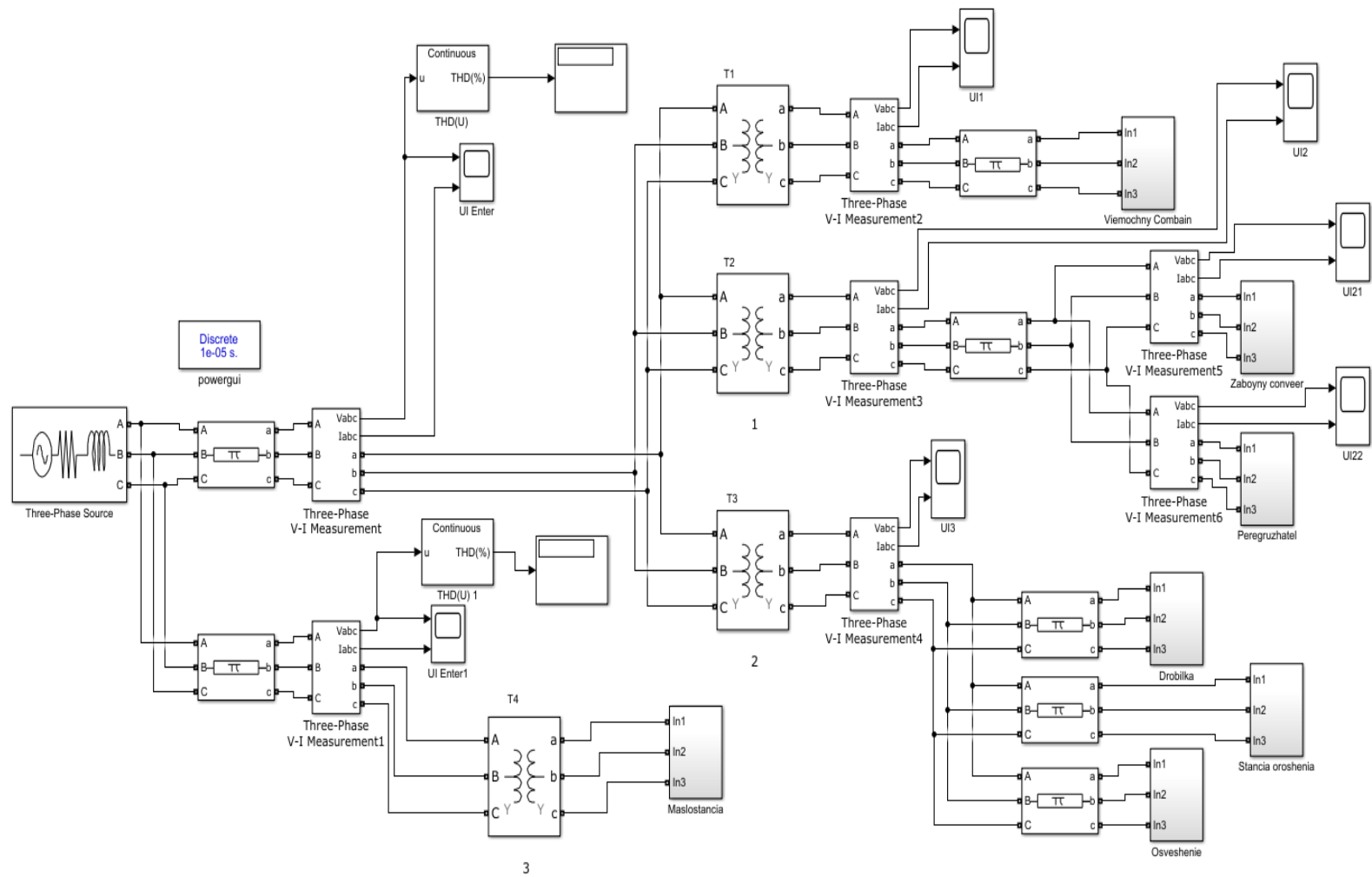


Рисунок 4.8 - Имитационная модель ЭТС для исследования режимов генерирования ВГС в электрической сети выемочного участка

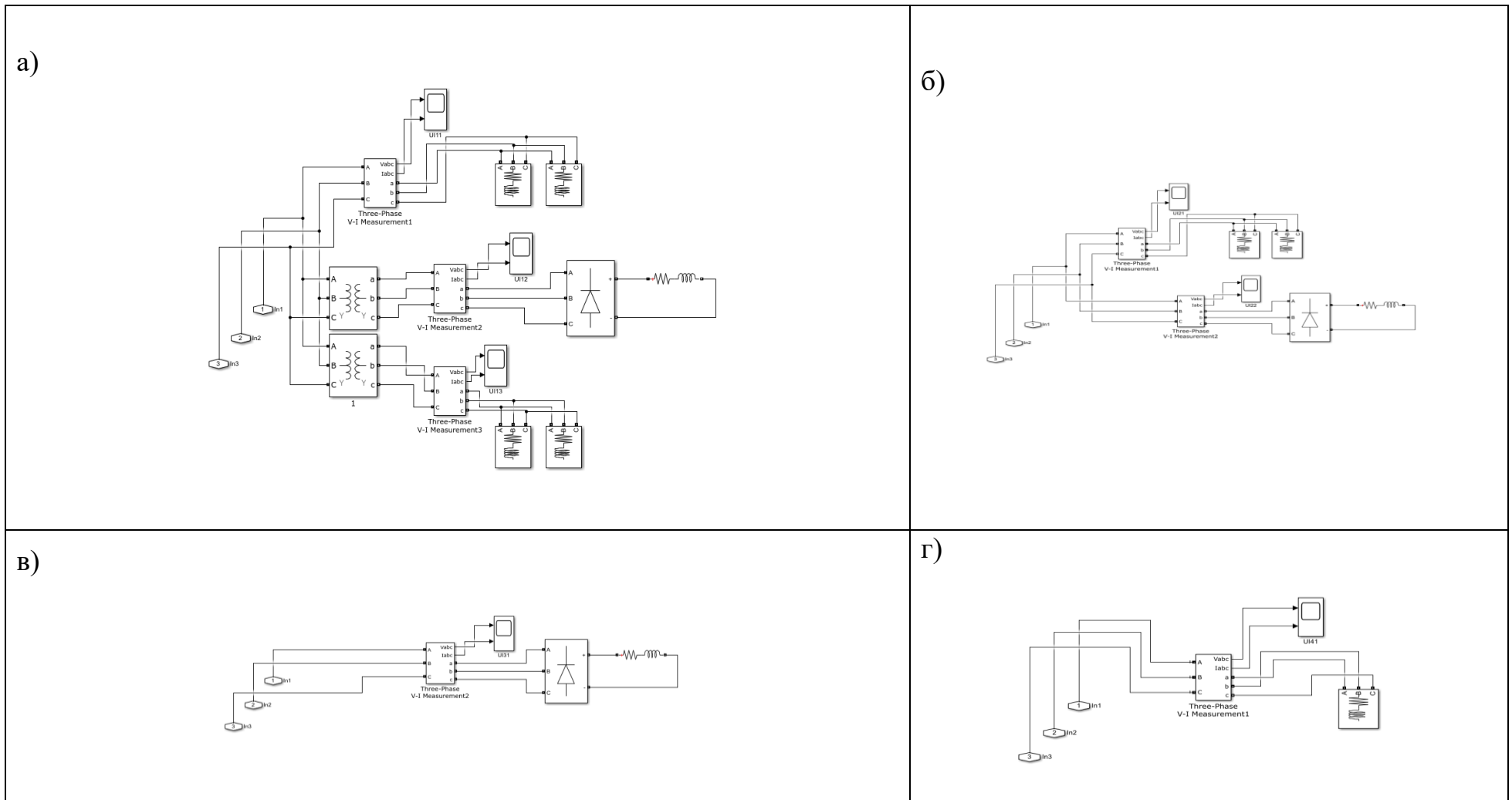


Рисунок 4.9 – Подсистемы имитационной модели ЭТС: а) выемочного комбайна; б) забойного конвейера; в) перегружателя; г) дробилки, маслостанции крепи, станции орошения

Техническая характеристика понизительных подстанций энергопоездов выемочного участка и кабелей, примененных при моделировании, приведена соответственно в Приложении 5, табл. П.5.1 и Приложении 6, табл. П.6.1.

Подсистема модели выемочного комбайна (рис. 4.9а) состоит из: универсальных измерителей напряжения и тока; осциллографов; трансформаторов; активно-индуктивной нагрузки, имитирующей функционирование электродвигателя; нелинейной нагрузки имитирующей источник ВГС соответствующей мощности.

Подсистема модели забойного конвейера (рис. 4.9б) состоит из: универсальных измерителей напряжения и тока; осциллографов; активно-индуктивной нагрузки, имитирующей функционирования электродвигателя; нелинейной нагрузки имитирующей источник ВГС соответствующей мощности.

Подсистема модели перегружателя (рис. 4.9в) состоит из: универсального измерителя напряжения и тока; осциллографа; нелинейной нагрузки имитирующей источник ВГС соответствующей мощности.

Подсистемы моделей дробилки, маслостанции, станции орошения (рис. 4.9г) состоят из: универсального измерителя напряжения и тока; осциллографа; активно-индуктивной нагрузки, имитирующей функционирование электродвигателя.

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

Результаты имитационного моделирования приведены в табличном, графическом и аналитическом виде.

Зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения ($K_{U_{вк}}$) от мощности электроприводов резания ($P_{п.р.}$) и подачи ($P_{п.п}$) выемочного комбайна приведена в табл. 4.4.

Таблица 4.4 – Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения ($K_{U_{ВК}}$) в зависимости от мощности электроприводов резания (нерегулируемого) и подачи (регулируемого) выемочного комбайна

Привод поддачи, кВт ($U=0,4$ кВ)	Привод резания, кВт ($U=3,3$ кВ)									
	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
20	1,539	1,448	1,331	1,214	1,106	1,012	0,932	0,865	0,809	0,758
30	2,003	1,891	1,746	1,601	1,470	1,357	1,261	1,178	1,107	1,045
40	2,423	2,293	2,127	1,965	1,815	1,685	1,574	1,479	1,396	1,323
50	2,839	2,680	2,489	2,305	2,142	2,001	1,871	1,769	1,676	1,593
60	3,219	3,043	2,831	2,633	2,456	2,300	2,166	2,05	1,946	1,854
70	3,578	3,386	3,164	2,945	2,757	2,590	2,446	2,32	2,208	2,107
80	3,926	3,718	3,477	3,248	3,047	2,869	2,717	2,582	2,461	2,351
90	4,264	4,039	3,779	3,54	3,325	3,141	2,977	2,835	2,707	2,59
100	4,583	4,346	4,072	3,821	3,595	3,403	3,231	3,081	2,945	2,82
110	4,894	4,644	4,356	4,093	3,957	3,657	3,477	3,319	3,176	3,044
120	5,197	4,932	4,629	4,356	4,143	3,901	3,717	3,551	3,400	3,142

Данные табл. 4.4 показывают, что увеличение мощности нерегулируемого электропривода резания при определенном значении регулируемого электропривода подачи приводит к уменьшению $K_{U_{BK}}$.

В качестве примера на рис. 4.10 приведены синусоида напряжения с искажениями, гармонический состав и суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения $K_{U_{BK}}$ в точке присоединения электрооборудования выемочного комбайна к понизительной подстанции энергопоезда. Данные на рис.4.10 получены для точки моделирования при мощности электропривода резания 500 кВт и электропривода подачи 110 кВт (табл. 4.4). Значение $K_{U_{BK}}$ в указанной точке равно 3,96 %. Напряжение электропитания выемочного комбайна – 3300 В.

Геометрическая интерпретация зависимости $K_{U_{BK}}$ от мощности приводов подачи (регулируемого) и резания (нерегулируемого) соответствует поверхность в трехмерном пространстве, приведенная на рис. 4.11.

Для упрощения анализа режимов генерирования ВГС выполнена аппроксимация результатов моделирования с получением аналитических зависимостей проекций вышеуказанной поверхности на плоскости мощностей привода подачи ($P_{п.п.}$) и привода резания ($P_{п.р.}$).

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 мощности резания ($P_{п.р.}=1000$ кВт) (рис. 4.12) описывается выражением:

$$K_{U_{BK}}=0,32+0,025* P_{п.п.} \quad (4.1)$$

Зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения, генерируемых преобразовательным устройством схемы управления электроприводом выемочного комбайна ($K_{U_{BK}}$) от мощности резания ($P_{п.р.}$) при мощности привода подачи ($P_{п.п.}=120$ кВт) (рис.4.13) описывается выражением:

$$K_{U_{BK}}=5,29-0,0022* P_{п.р.} \quad (4.2)$$

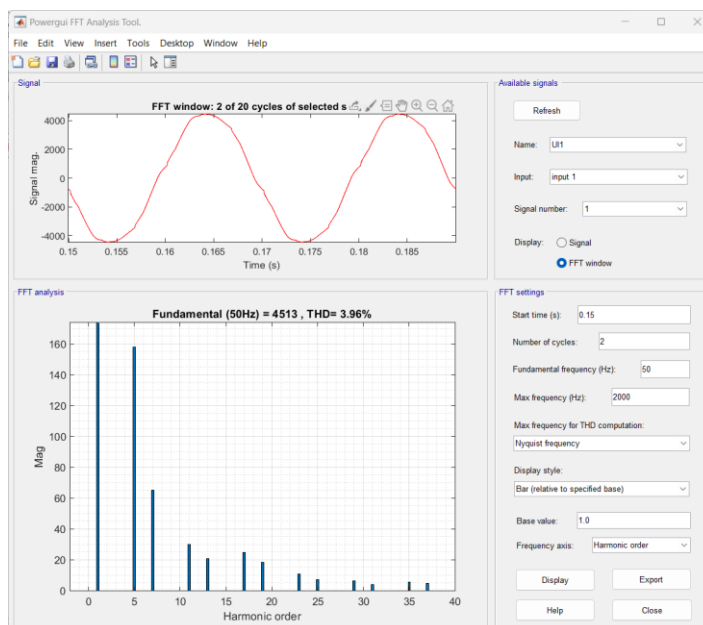


Рисунок 4.10 - Синусоида напряжения с искажениями, гармонический состав и суммарный коэффициент гармонических составляющих выемочного комбайна

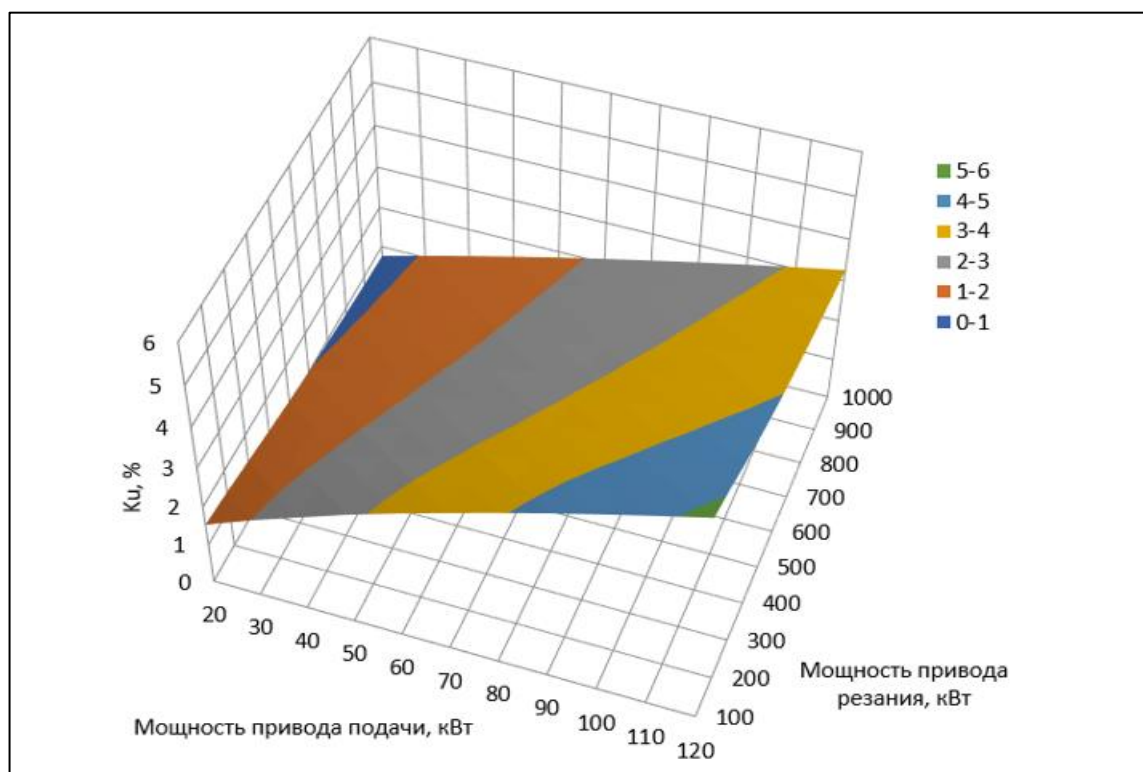


Рисунок 4.11 – Геометрическая интерпретация зависимости суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения от мощности приводов подачи (регулируемого) и резания (нерегулируемого) выемочного комбайна, $K_{УВК} = f(P_{п.п.}, P_{п.р.})$

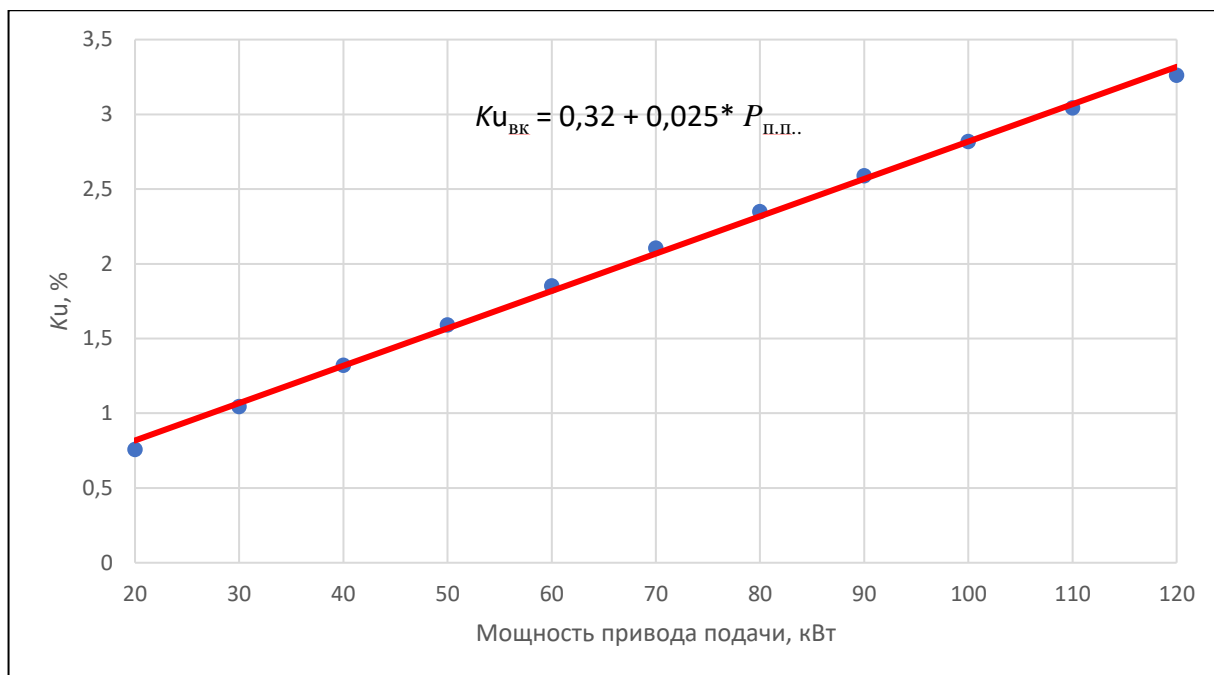


Рисунок 4.12 – Зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения выемочного комбайна ($K_{U_{BK}}$) от мощности привода подачи ($P_{п.п.}$) при фиксированной мощности резания ($P_{п.р.}=1000$ кВт)

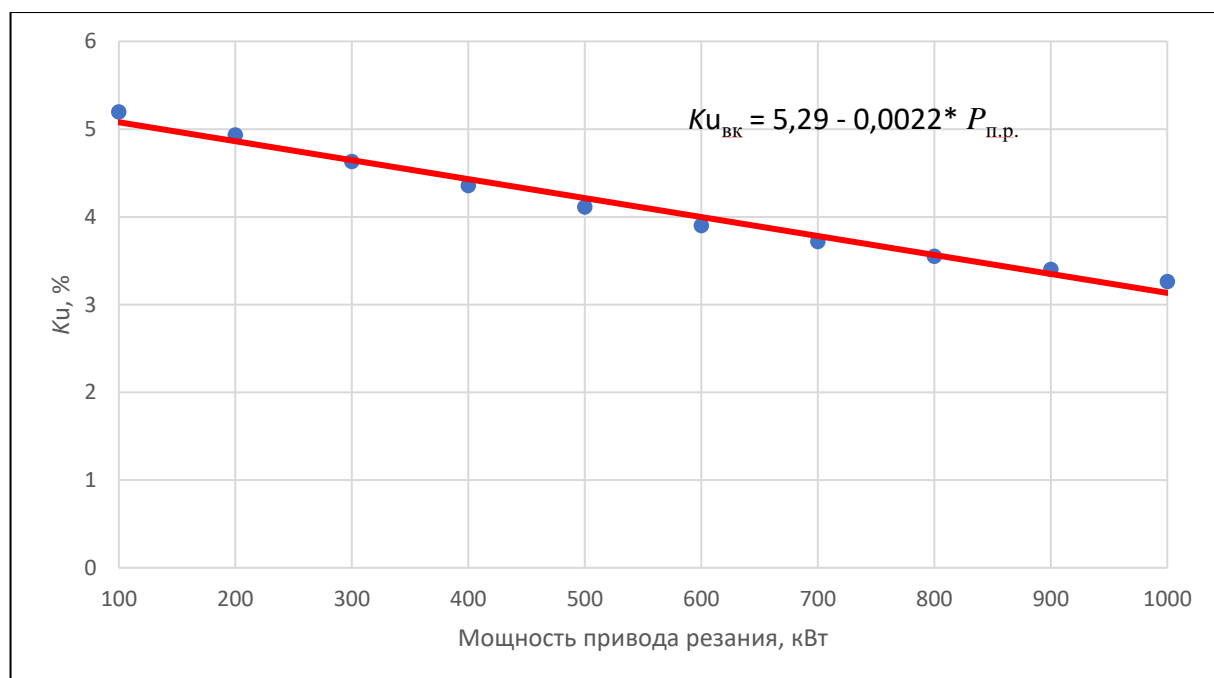


Рисунок 4.13 Зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения выемочного комбайна ($K_{U_{BK}}$) от мощности резания ($P_{п.р.}$) при фиксированной мощности привода подачи ($P_{п.п.}=120$ кВт)

Данные табл. 4.4 показывают, что суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения ($K_{U_{ВК}}$) имеет значения (за исключением значения, $K_{U_{ВК}}$ равного 5,197 % при $P_{п.п.}=120$ кВт и $P_{п.р.}=100$ кВт), не превышающие требуемое по ГОСТ 32144-2013, равное 5 %.

С учетом того, что суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения ($K_{U_{ВК}}$) имеет значения, не превышающие требуемое по ГОСТ 32144-2013 то можно сделать вывод, что в схему электроснабжения выемочного комбайна не требуется установка ФКУ.

Зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения ($K_{U_{ЗК}}$) от мощности основного привода ($P_{о.п.}$) и вспомогательного ($P_{в.п.}$) забойного конвейера приведена в табл. 4.5. Данные табл. 4.5 показывают, что увеличение мощности основного привода ($P_{о.п.}$) для определенных значений вспомогательного привода ($P_{в.п.}$) приводит к уменьшению $K_{U_{ЗК}}$.

В качестве примера на рис. 4.14 приведены синусоида с искажениями, гармонический состав и суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения $K_{U_{ЗК}}$ в точке присоединения электрооборудования забойного конвейера к понизительной подстанции энергопоезда. Данные на рис.4.14 получены для точки моделирования при мощности основного привода 1000 кВт и мощности вспомогательного привода 500 кВт (табл. 4.5). Значение $K_{U_{ЗК}}$ в указанной точке равно 15,75 %. Напряжение электропитания забойного конвейера – 1140 В.

Геометрическая интерпретация зависимости $K_{U_{ЗК}}$ от мощности основного (нерегулируемого) и вспомогательного (регулируемого) приводов забойного конвейера соответствует поверхности в трехмерном пространстве, приведенной на рис. 4.15.

Для упрощения анализа режимов генерирования ВГС выполнена аппроксимация результатов моделирования с получением аналитических зависимостей вышеуказанной трехмерной поверхности на плоскости мощностей основного привода ($P_{о.п.}$) и вспомогательного привода ($P_{в.п.}$).

Таблица 4.5 – Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения ($K_{U_{3к}}$) в зависимости от мощности основного (нерегулируемого) и вспомогательного (регулируемого) приводов забойного конвейера

Привод вспомогательный, кВт ($U=1,14$ кВ)	Привод основной, кВт ($U=1,14$ кВ)									
	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500
100	10,76	7,48	5,69	4,49	4,25	3,89	3,64	3,45	3,30	3,18
200	23,62	12,86	9,27	7,48	6,40	5,69	5,17	4,79	4,49	4,25
300	-	18,24	12,86	10,17	8,56	7,48	6,71	6,14	5,69	5,33
400	-	23,62	16,45	12,86	10,71	9,27	8,25	7,48	6,88	6,40
500	-	29,00	20,03	15,75	12,86	11,07	9,79	8,83	8,08	7,48
600	-	-	23,62	18,24	15,01	12,86	11,32	10,17	9,27	8,56
700	-	-	27,21	20,93	17,16	14,65	12,86	11,52	10,47	9,63
800	-	-	-	23,62	19,32	16,45	14,40	12,86	11,66	10,71
900	-	-	-	26,31	21,47	18,24	15,93	14,21	12,86	11,78
1000	-	-	-	29,00	23,62	20,03	17,47	15,55	14,06	12,86
1100	-	-	-	-	25,77	21,83	19,01	16,90	15,25	13,94

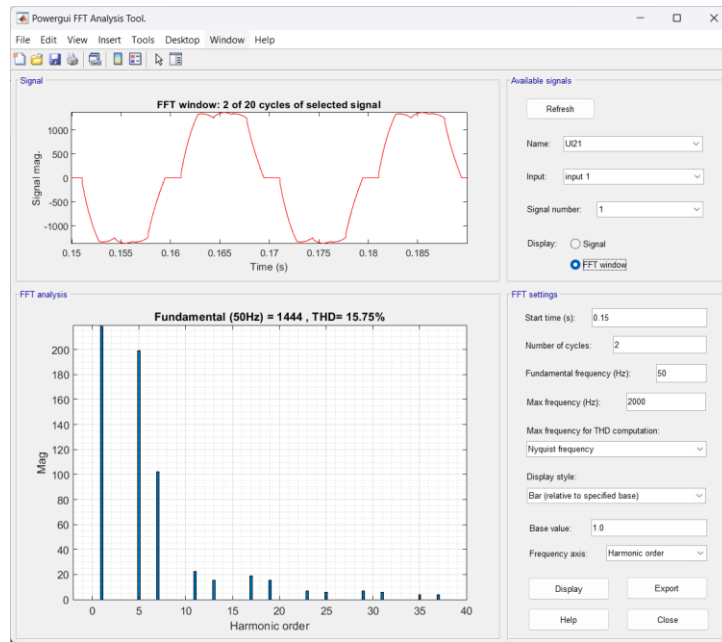


Рисунок 4.14 - Синусоида напряжения с искажениями, гармонический состав и суммарный коэффициент гармонических составляющих забойного конвейера

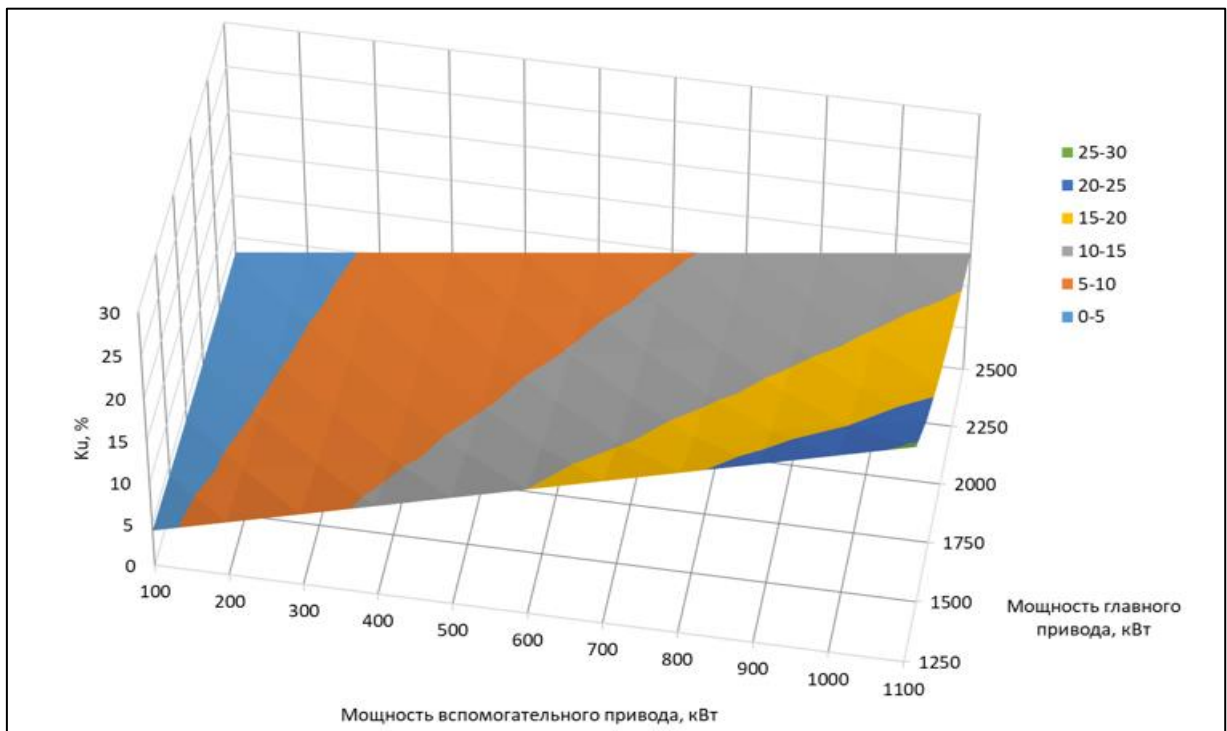


Рисунок 4.15 – Геометрическая интерпретация зависимости суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения от мощности приводов основного и вспомогательного забойного конвейера,

$$K_{U_{3K}} = f(P_{\text{о.п.}}, P_{\text{в.п.}})$$

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 определенной мощности вспомогательного привода ($P_{в.п.}=1100$ кВт) (рис. 4.16) описывается выражением:

$$K_{U_{зк}} = 28,38 - 0,005 * P_{о.п.} \quad (4.3)$$

Зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения, генерируемых преобразовательным устройством схемы управления электроприводом забойного конвейера ($K_{U_{зк}}$), от мощности вспомогательного привода ($P_{в.п.}$) при определенной мощности основного привода ($P_{о.п.}=2500$ кВт) (рис. 4.17) описывается выражением:

$$,K_{U_{зк}}=8,69+0,0076*P_{в.п..} \quad (4.4)$$

В соответствии с данными табл. 4.5 диапазон изменения $K_{U_{зк}}$ составляет 3,18 – 29,00 %.

Данные табл. 4.5 показывают, что суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения ($K_{U_{зк}}$) имеет значения (за исключением значений $K_{U_{зк}}$ в диапазоне $P_{о.п.}$ 1000 – 2500 кВт и $P_{в.п.}$, равном 100 кВт, а также в диапазоне $P_{о.п.}$ 2000 – 2500 кВт и $P_{в.п.}$, равном 200 кВт), превышающие требуемое по ГОСТ 32144-2013, равное 5 %, на 0,69 – 24,00 %. На этом основании делается вывод, что в схему электроснабжения забойного конвейера требуется установка ФКУ.

Значения суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения ($K_{U_{п}}$) от мощности привода перегружателя приведена в табл. 4.6.

С применением метода аппроксимации получена зависимость $K_{U_{п}}$ от мощности привода перегружателя ($P_{п.}$).

Зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения, генерируемых преобразовательным устройством схемы управления электроприводом перегружателя ($K_{U_{п}}$), от мощности привода перегружателя (рис. 4.18) описывается выражением:

$$K_{U_{п}}=14,25+0,089* P_{п.} \quad (4.5)$$

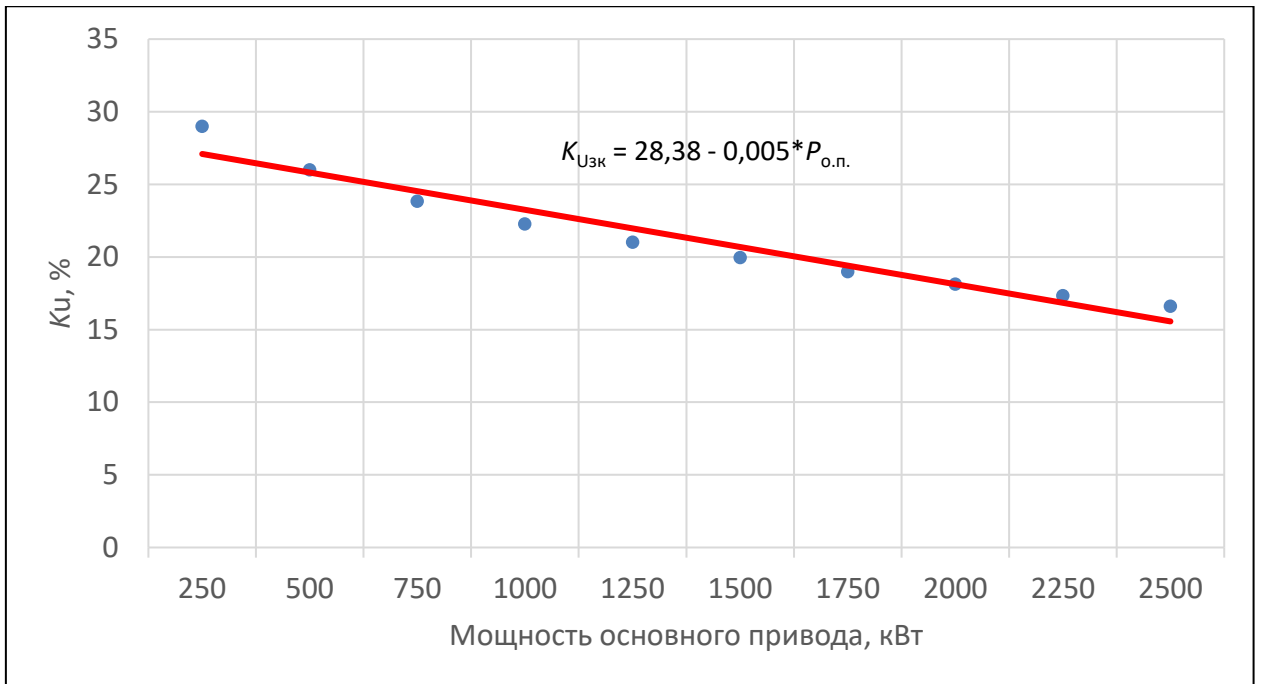


Рисунок 4.16 – Зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения забойного конвейера ($K_{UЗК}$) от мощности основного привода ($P_{о.п.}$) при фиксированной мощности вспомогательного привода ($P_{в.п.}=1100$ кВт)

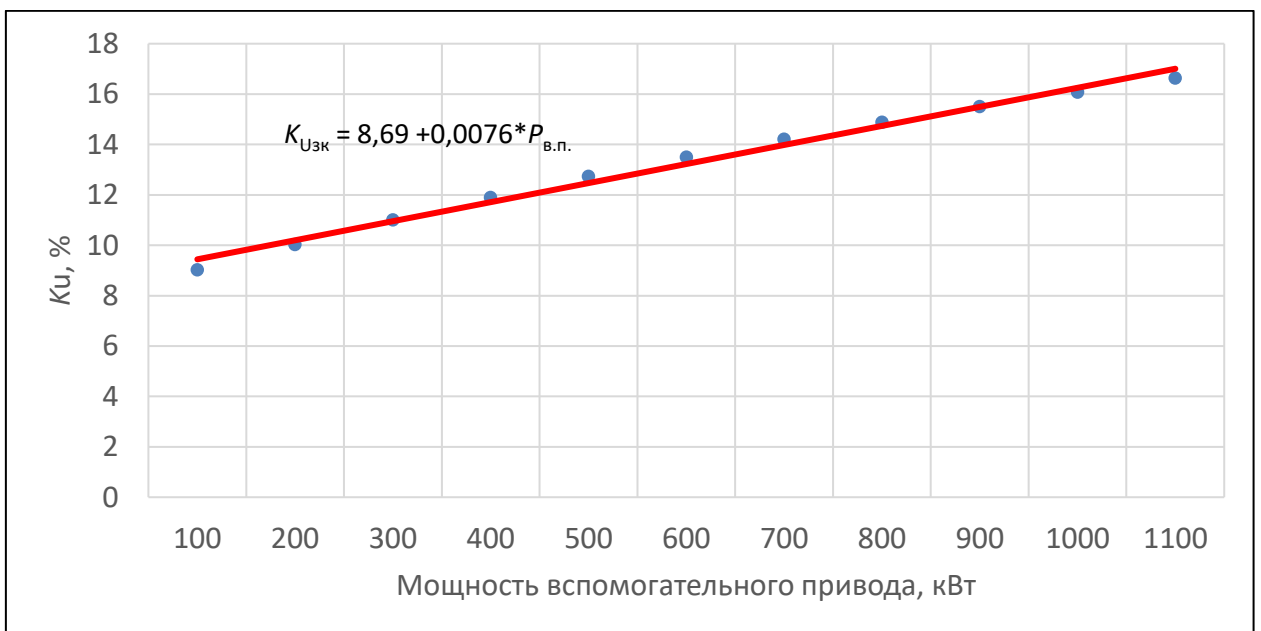


Рисунок 4.17 - Зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения забойного конвейера ($K_{UЗК}$) от мощности вспомогательного привода ($P_{в.п.}$) при фиксированной мощности основного привода ($P_{о.п.}=2500$ кВт)

Таблица 4.6 – Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения ($K_{Uп}$) в зависимости от мощности привода перегружателя

Мощность перегружателя, кВт	K_U , %	Мощность перегружателя, кВт	K_U , %
200	15,82	375	17,52
225	16,08	400	17,73
250	16,37	425	17,94
275	16,59	450	18,14
300	16,82	475	18,32
325	17,07	500	18,54
350	17,29	525	18,72

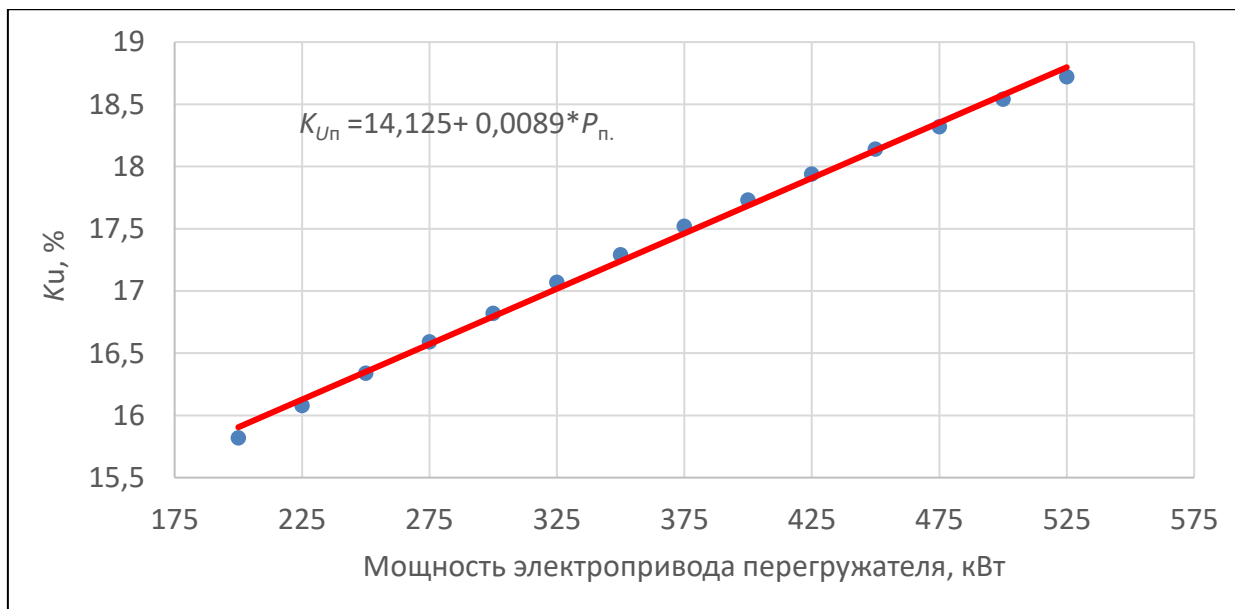


Рисунок 4.18 – Зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения ($K_{Uп}$) от мощности привода перегружателя

$$K_{Uп} = f(P_{п.})$$

Данные табл. 4.6, а также зависимость 4.5 показывают, что суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения ($K_{UП}$) имеет значения, превышающие требуемое по ГОСТ 32144-2013, равное 5 %, на 10,82 – 13,72 %

В качестве примера на рис. 4.19 приведены синусоида напряжения с искажениями, гармонический состав и суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения $K_{UП}$ в точке присоединения электрооборудования перегружателя к понизительной подстанции энергопоезда. Данные рис. 4.19 получены для точки моделирования при мощности привода перегружателя 250 кВт. Значение $K_{UП}$ равно 16,37 %. Напряжение электропитания перегружателя – 1140 В.

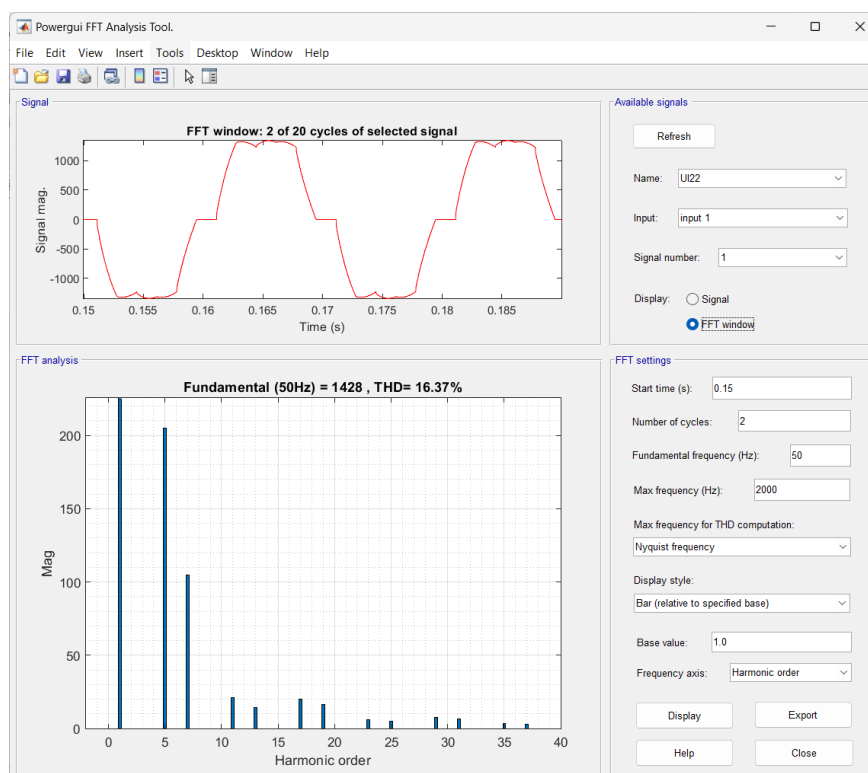


Рисунок 4.19 - Синусоида напряжения с искажениями, гармонический состав и суммарный коэффициент гармонических составляющих перегружателя

Вышеизложенные результаты исследования режимов генерирования показали, что:

- преобразовательные устройства схем управления электроприводами выемочного комбайна генерируют ВГС, значения суммарные коэффициенты гармонических составляющих напряжения которых K_U не превышают требуемое значение ГОСТ 32144 – 2013, равное 5 %.
- преобразовательные устройства схем управления электроприводами забойного конвейера и перегружателя генерируют ВГС, суммарные коэффициенты гармонических составляющих напряжения которых превышают допустимый уровень по ГОСТ 32144 – 2013, равный 5 %.

Это требует разработки технических решений по снижению уровня ВГС в электрических сетях выемочных участков.

4.2.2 Исследование режимов генерирования высших гармонических составляющих в электрических сетях проходческого участка

Исследование режимов генерирования ВГС в электрических сетях проходческого участка проведено в соответствии с Методикой имитационного моделирования режимов генерирования ВГС в ЭТС угольных шахт (п.3.3). Имитационная модель ЭТС проходческого участка для исследования режимов генерирования ВГС, приведенная на рис. 4.20, состоит из: источника напряжения; участковых понизительных подстанций энергопоезда; кабельных линий; линейных нагрузок технологического оборудования имитирующих функционирования электродвигателя (ленточного конвейера №1, ленточного перегружателя, ленточного конвейера №2, станции орошения, вентиляторов местного проветривания) и подсистемы (рис. 4.21), имитирующей работу проходческого комбайна.

Моделирование режимов генерирования ВГС проведено для диапазонов изменения электротехнических показателей электроприемников проходческого участка, приведенных в табл. 4.7. В приложении 4, табл. П.4.2 приведена техническая характеристика проходческих комбайнов.

Техническая характеристика понизительных подстанций энергопоездов проходческого участка и кабелей, примененных при моделировании, приведена соответственно в Приложении 5, табл. П.5.1 и Приложении 6, табл. П.6.1.

Подсистема модели проходческого комбайна (рис. 4.21) состоит из: универсальных измерителей напряжении и тока; осциллографов; вводного дросселя; активно-индуктивных нагрузок имитирующих функционирования электродвигателей органа резания, насосов гидравлической системы исполнительного органа, насосов гидравлической системы питателя, скребкового перегружателя; нелинейной нагрузки, имитирующей источник ВГС системы перемещения проходческого комбайна.

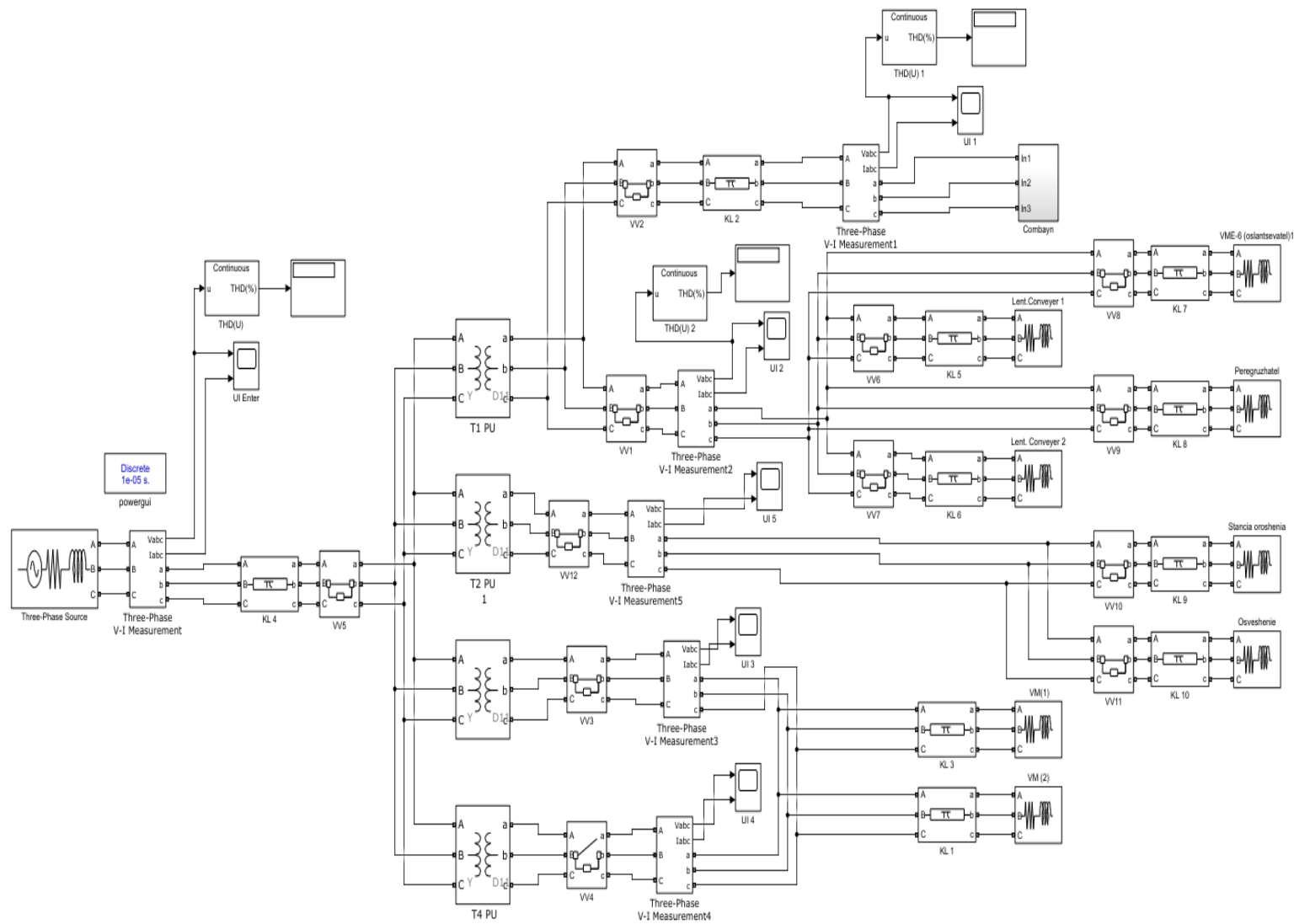


Рисунок 4.20 - Имитационная модель ЭТС для исследования режимов генерирования ВГС в электрической сети проходческого участка

Таблица 4.7 - Диапазоны изменения электротехнических показателей электроприемника проходческого участка при моделировании режимов ВГС

Электроприемник генерирующий ВГС	Диапазоны изменения электротехнических показателей			
	Напряжение, кВ	Суммарная мощность, кВт	Мощность регулируемого электропривода, кВт	Мощность нерегулируемого электропривода, кВт
Проходческий комбайн	0,66; 1,14	165 - 496	40 - 96	125 - 400

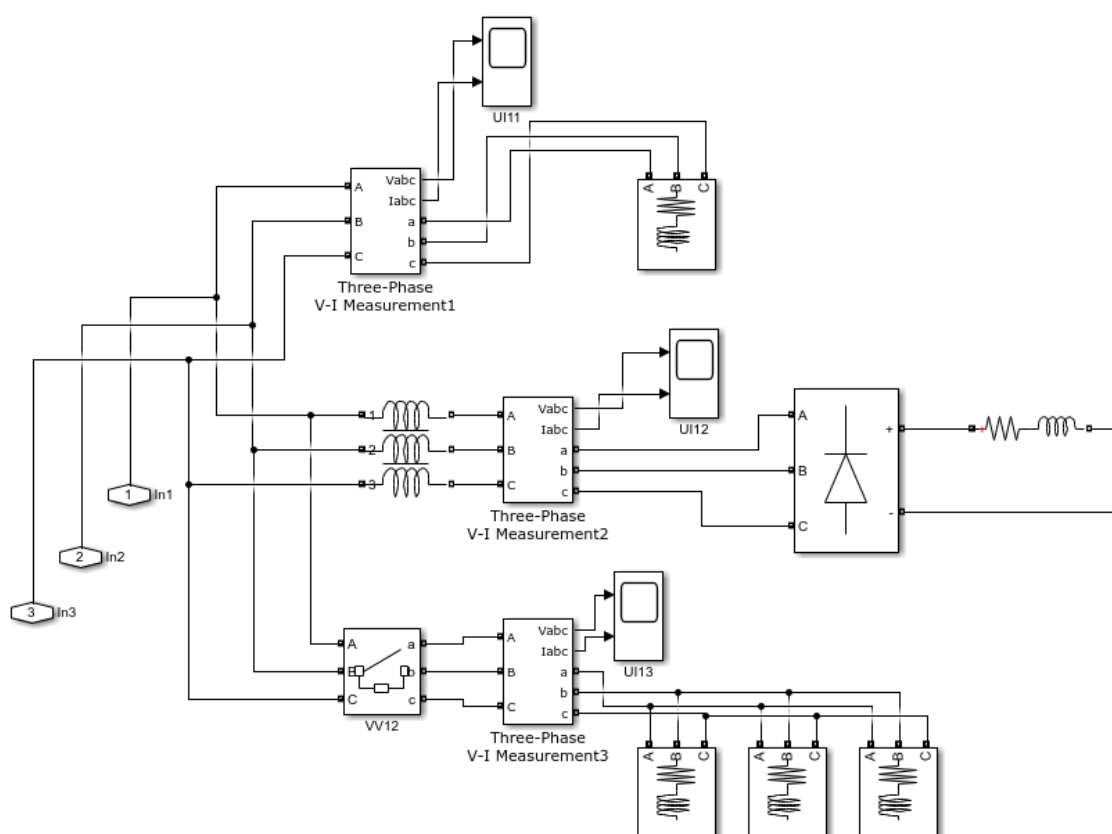


Рисунок 4.21 - Подсистема имитационной модели ЭТС проходческого комбайна

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

Результаты имитационного моделирования приведены в табличном, графическом и аналитическом виде. Значения суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения ($K_{U_{гк}}$) от мощности регулируемых ($P_{р.п.}$) и нерегулируемых ($P_{н.п.}$) электроприводов проходческого комбайна приведена в табл. 4.8.

Данные табл. 4.8 показывают, что увеличение мощности нерегулируемого привода ($P_{н.п.}$) для определенных значений регулируемого привода ($P_{р.п.}$) приводит к уменьшению $K_{U_{гк}}$.

В качестве примера на рис. 4.22 приведены синусоида напряжения с искажениями, гармонический состав и суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения $K_{U_{гк}}$ в точке присоединения электрооборудования проходческого комбайна к понизительной подстанции энергопоезда. Данные рис. 4.22 получены для точки моделирования при мощности регулируемого привода 90 кВт и мощности нерегулируемого привода 400 кВт. Значение $K_{U_{гк}}$ равно 4,39 %. Напряжение электропитания перегружателя – 1140 В.

Геометрическая интерпретация зависимости $K_{U_{гк}}$ от мощности нерегулируемых и регулируемых приводов соответствует поверхность в трехмерном пространстве, приведенная на рис. 4.23.

Для упрощения анализа режимов генерирования ВГС выполнена аппроксимация результатов моделирования с получением аналитических зависимостей вышеуказанной поверхности на плоскости мощностей регулируемого ($P_{р.п.}$) и нерегулируемого приводов ($P_{н.п.}$).

Зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения, генерируемых преобразовательным устройством схемы управления электроприводом проходческого комбайна ($K_{U_{гк}}$),

Таблица 4.8 –Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения ($K_{U_{гк}}$) в зависимости от мощности нерегулируемого и регулируемого приводов проходческого комбайна

Мощность регулируемого привода, кВт	Мощность нерегулируемых приводов, кВт												
	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360	380	400
40	2,97	2,93	2,88	2,83	2,79	2,74	2,7	2,65	2,61	2,56	2,52	2,48	2,44
50	3,48	3,43	3,38	3,33	3,28	3,23	3,18	3,13	3,08	3,03	2,98	2,94	2,89
60	3,95	3,9	3,84	3,79	3,74	3,68	3,63	3,57	3,52	3,47	3,41	3,36	3,31
70	4,39	4,33	4,27	4,22	4,16	4,1	4,04	3,98	3,93	3,87	3,81	3,75	3,7
80	4,79	4,73	4,67	4,61	4,55	4,49	4,43	4,36	4,3	4,24	4,18	4,12	4,06
90	5,17	5,1	5,04	4,98	4,91	4,85	4,78	4,72	4,65	4,59	4,52	4,46	4,39

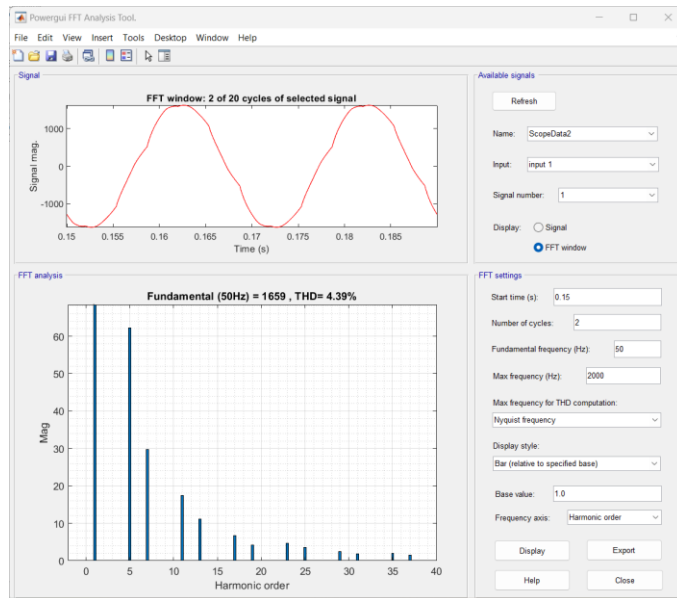


Рисунок 4.22 – Синусоида напряжения с искажениями, гармонический состав и суммарный коэффициент гармонических составляющих K_U модели проходческого комбайна

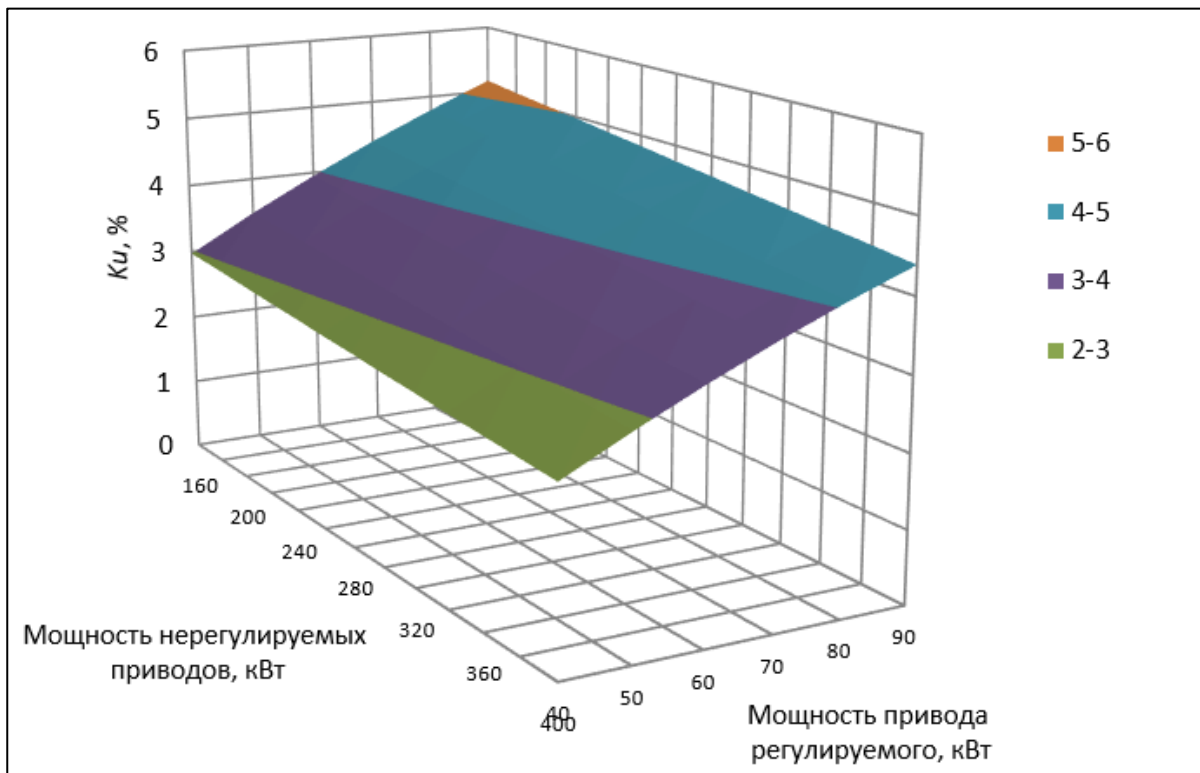


Рисунок 4.23 – Геометрическая интерпретация зависимости суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения от мощности нерегулируемого и регулируемого приводов проходческого комбайна,

$$K_{UПК} = f(P_{н.п.}, P_{р.п.})$$

от мощности регулируемого привода ($P_{р.п.}$) для определенных значений нерегулируемого привода ($P_{н.п.} = 260$ кВт) (рис. 4.24) описывается выражением:

$$K_{U_{ПК}} = 2,824 + 0,0504 * P_{р.п.} \quad (4.6)$$

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 определенных значениях регулируемого привода ($P_{р.п.} = 60$ кВт.) (рис. 4.25) описывается выражением:

$$K_{U_{ПК}} = 11,205 - 0,0191 * P_{н.п.} \quad (4.7)$$

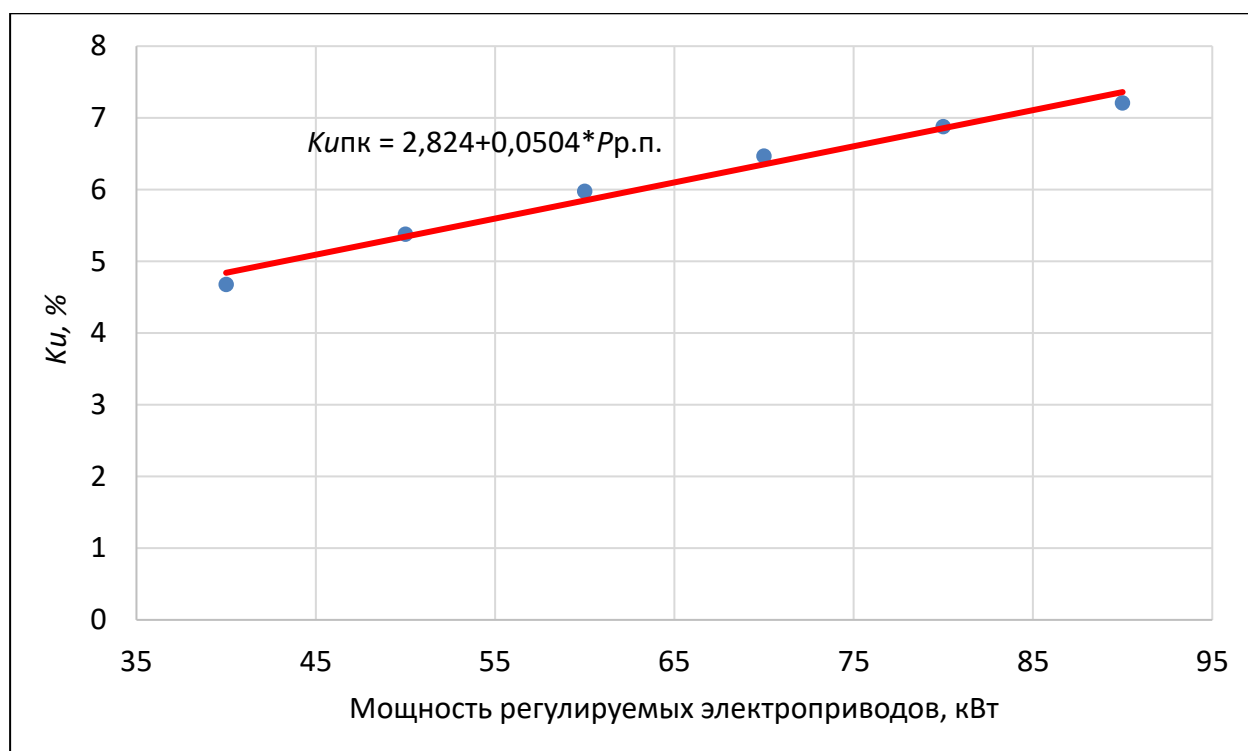


Рисунок 4.24 - Зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения проходческого комбайна ($K_{U_{ПК}}$) от мощности регулируемого привода ($P_{р.п.}$) при определенной мощности нерегулируемого привода ($P_{н.п.} = 260$ кВт)

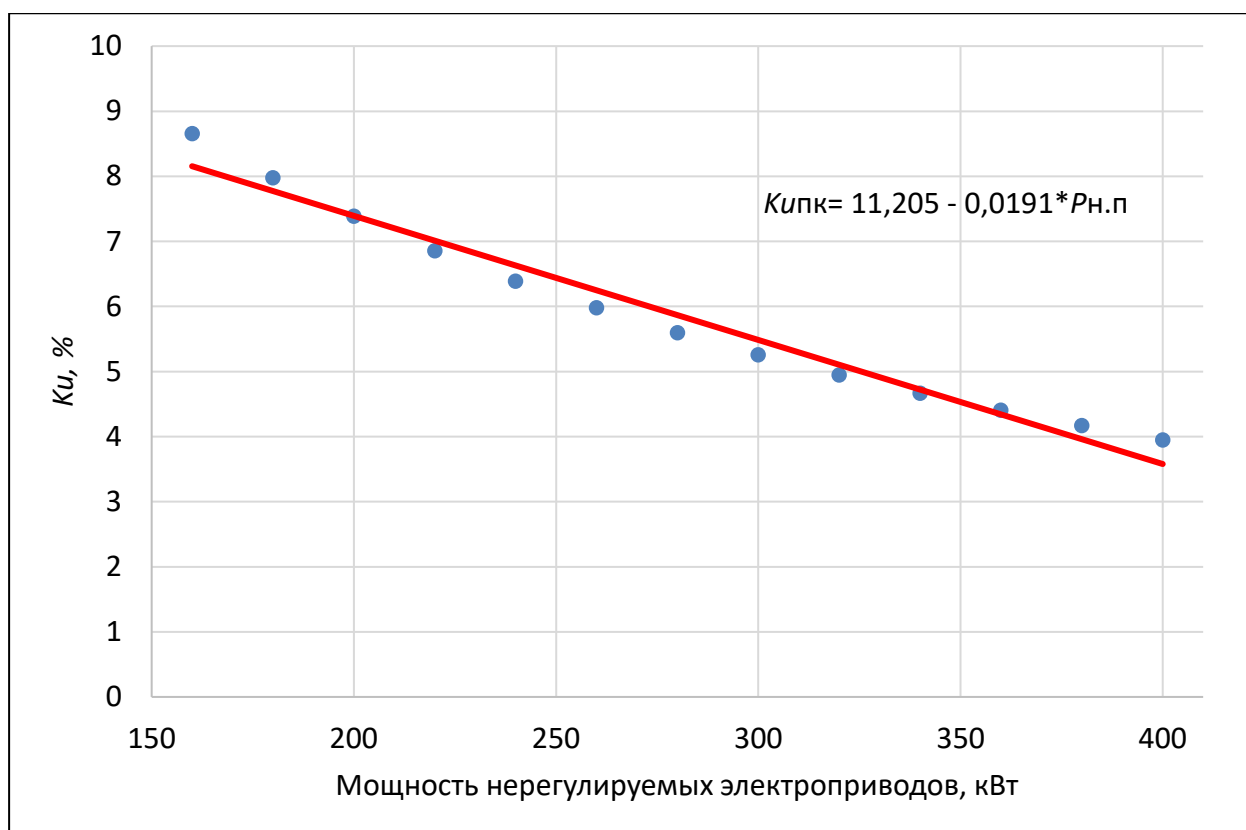


Рисунок 4.25 – Зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения проходческого комбайна ($K_{U_{ПК}}$) от мощности нерегулируемого привода ($P_{н.п.}$) при определенной мощности регулируемого привода ($P_{р.п.} = 60$ кВт)

Данные табл. 4.8 показывают, что суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения ($K_{U_{ПК}}$) имеет значения (за исключением значения 5,17 % при $P_{р.п.} = 90$ кВт и $P_{н.п.} = 160$ кВт и значения 5,1 % при $P_{р.п.} = 90$ кВт и $P_{н.п.} = 180$ кВт), не превышающие требуемое по ГОСТ 32144-2013, равное 5 %.

На основании вышеприведенных результатов моделирования режимов генерирования ВГС преобразовательным устройством схемы управления электроприводом проходческого комбайна, делается вывод, что в схему электроснабжения комбайна не требуется установка ФКУ.

4.3 Методика выбора средств повышения показателей качества электроэнергии в подземных участковых электротехнических системах

Методика выбора средств повышения показателей качества электроэнергии в подземных участковых ЭТС 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 ФК, определение места установки ФКУ; моделирование режимов генерирования ВГС в подземной участковой ЭТС с ФКУ; оценку результатов моделирования режимов генерирования ВГС в подземной участковой ЭТС с ФКУ на соответствие требованиям ГОСТ 32144–2013; разработку рекомендаций по повышению ПКЭ в подземной участковой ЭТС.

Методика выбора средств повышения показателей качества электроэнергии в подземных участковых ЭТС приведена в виде блок-схемы (рис. 4.26). Последовательность действий выбора средств повышения показателей качества электроэнергии в подземных участковых ЭТС угольных шахт следующая:

- 1) измерение и анализ результатов ПКЭ и коэффициента мощности $\cos\varphi$ в подземной участковой ЭТС (п.1):
 - 1.1) если значений ПКЭ в участковой подземной ЭТС соответствуют требуемым (п.2), а значения $\cos\varphi$ имеет высокое значение (п.3), то завершение исследования;
 - 1.2) если значения ПКЭ в модели участковой подземной ЭТС не соответствуют требуемым (п.2), а $\cos\varphi$ имеет низкое значение (п.3), то:

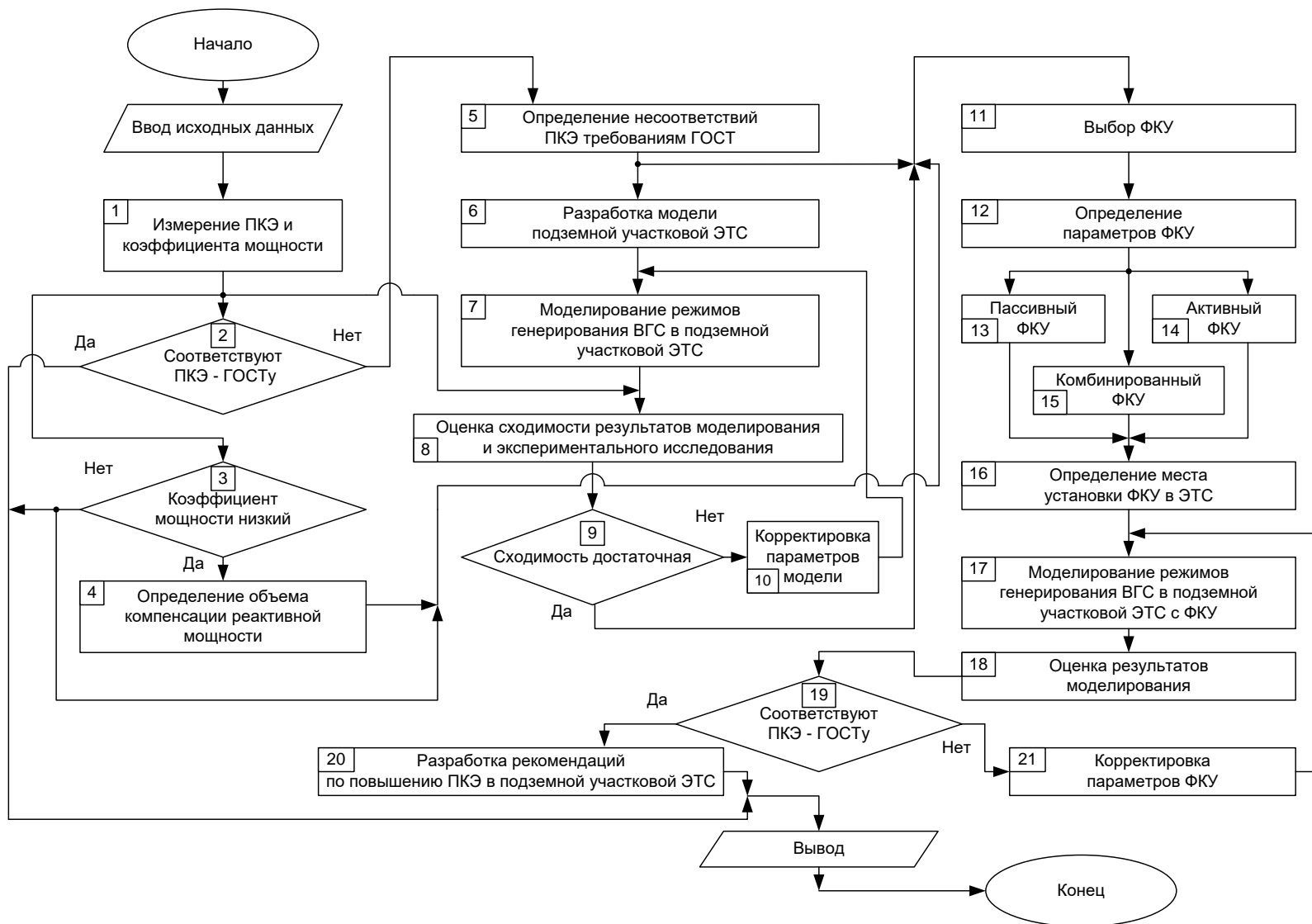


Рисунок 4.26 – Блок-схема методики выбора средств повышения показателей качества электроэнергии в подземных участковых ЭТС

- 1.2.1) определяются отклонения значений ПКЭ от требуемых ГОСТ 32144–2013 (п.5);
- 1.2.2) определяется необходимый объем компенсации реактивной составляющей мощности (п.4);
- 2) разрабатывается имитационная модель подземной участковой ЭТС (п.6);
- 3) выполняется моделирование режимов генерирования ВГС в подземной участковой ЭТС (п.7);
- 4) устанавливается сходимость результатов моделирования и экспериментального исследования в подземной участковой ЭТС (п.8):
- 4.1) при высокой сходимости ($> 0,9$) результатов моделирования и экспериментального исследования (п.9) определяется место установки повышения показателей качества электроэнергии (ФКУ) в подземной участковой ЭТС (п.11);
- 4.2) при низкой сходимости ($< 0,9$) результатов моделирования и экспериментального исследования (п.9) выполняется корректировка параметров модели (п.10) и повторное моделирование режимов генерирования ВГС в подземной участковой ЭТС (п.7);
- 5) в соответствии с уставленными уровнями несоответствия ПКЭ требуемым значениям (п.5) и требуемым уровнем коэффициента мощности (п.4) происходит выбор ФКУ (п.11);
- 6) выполняется определение параметров ФКУ (п.12);
- 6.1) пассивный фильтр (п.13);
- 6.2) активный фильтр (п.14);
- 6.3) комбинированный фильтр (п.15);
- 7) определяется место установки ФКУ в ЭТС (п.16)
- 8) осуществляется моделирование режимов генерирования ВГС в подземной участковой ЭТС с ФКУ (п.17);
- 9) выполняется оценка результатов моделирования ПКЭ в подземной участковой ЭТС с ФКУ на соответствие требованиям ГОСТ 32144–2013 (п.18):

- 9.1) значения ПКЭ в модели участковой подземной ЭТС (п.19) соответствуют требуемым ГОСТ 32144–2013 то разработка рекомендаций по повышению ПКЭ в подземных участковых ЭТС угольных шахт (п.20);
- 9.2) значений ПКЭ в модели участковой подземной ЭТС (п.19) не соответствуют требуемым ГОСТ 32144–2013 то выполняется корректировка параметров ФКУ (п.21) и повторное моделирование режимов генерирования ВГС в подземной участковой ЭТС с ФКУ (п.17);
- 10) вывод и завершение исследований по выбору средств повышения показателей качества электроэнергии в подземных участковых ЭТС [172, 182].

4.4 Обоснование параметров и применения комбинированных фильтрокомпенсирующих устройств для повышения показателей качества электроэнергии в подземных электрических сетях

Исследования режимов генерирования ВГС в подземных участковых ЭТС угольных шахт показывает, что значения суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения превышают требуемое значение, установленное ГОСТ 32144-2013 в 1,86 – 2,7 раза (табл. 2.4). В связи с этим целесообразно провести обоснование параметров и применения ФКУ в подземных участковых ЭТС.

Имитационная модель ЭТС выемочного участка угольной шахты для исследования возможности ограничения уровня ВГС с применением ФКУ (рис. 4.27) состоит из: источника напряжения; участковых понизительных подстанций энергопоезда; кабельных линий; подсистем имитирующих работу электроприемников технологического оборудования выемочного участка выемочного комбайна, забойного конвейера, дробилки, перегружателя, маслостанции крепи, станции орошения, системы освещения. Вместе с этим в модель входит: измеритель значения суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U); система *Powergui*, служащая для определения спектра ВГС. В имитационную модель включено комбинированное ФКУ (состоящее из пассивных и активного фильтров ВГС и подсистемы, формирующей сигналы управления АФВГ (рис. 4.28)), и пассивный ФКУ. В систему управления АФВГ комбинированного ФКУ входят подсистемы: прямого и обратного преобразования Кларк, приведенная на рис. 4.28а; вычисления значений $\cos\phi$, приведенная на рис. 4.28б; релейного регулятора (выходного формирователя сигналов управления), приведенная на рис. 4.28в.

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

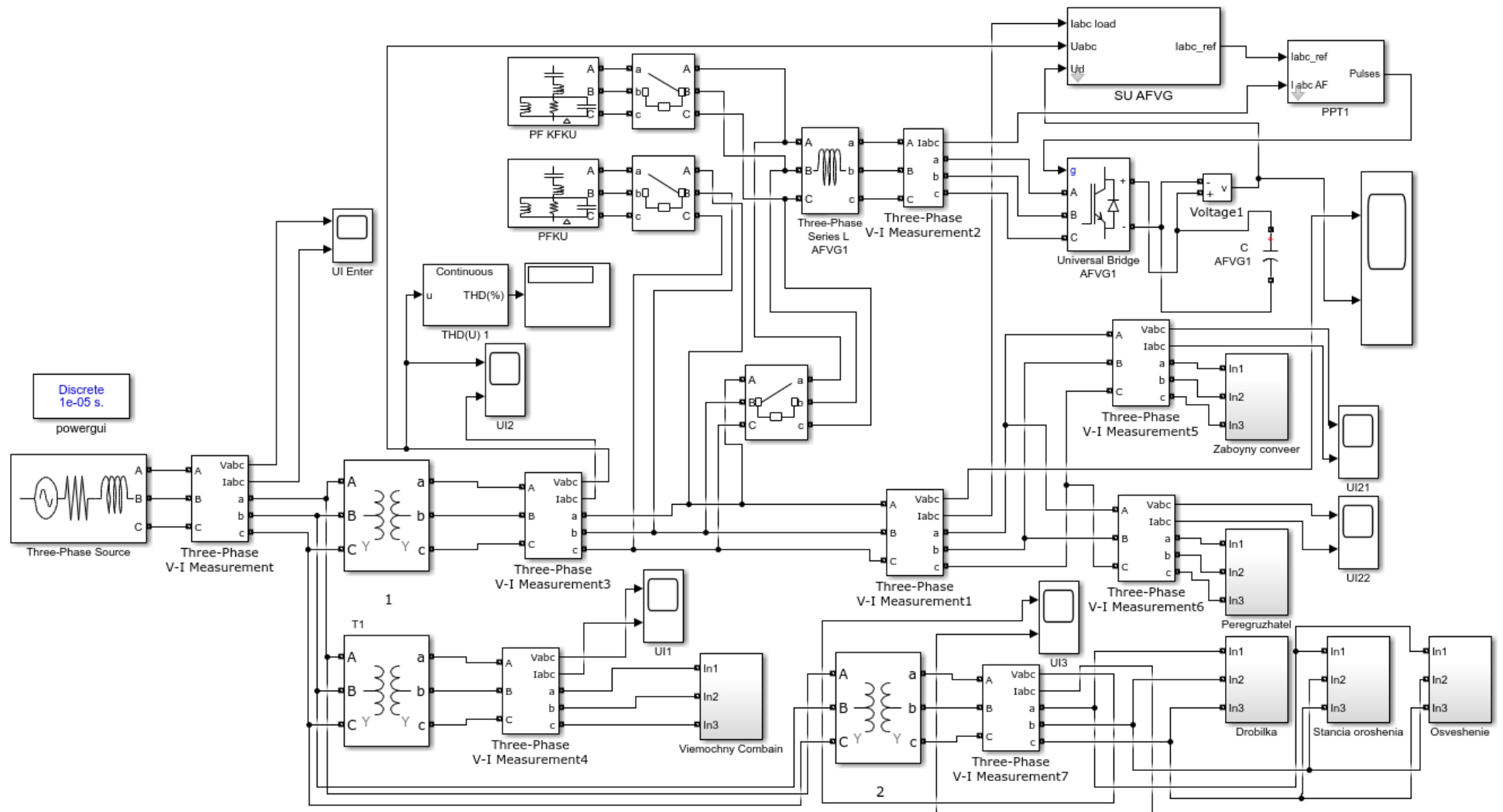


Рисунок 4.27 – Имитационная модель ЭТС выемочного участка угольной шахты для исследования возможности ограничения уровня ВГС с применением ФКУ

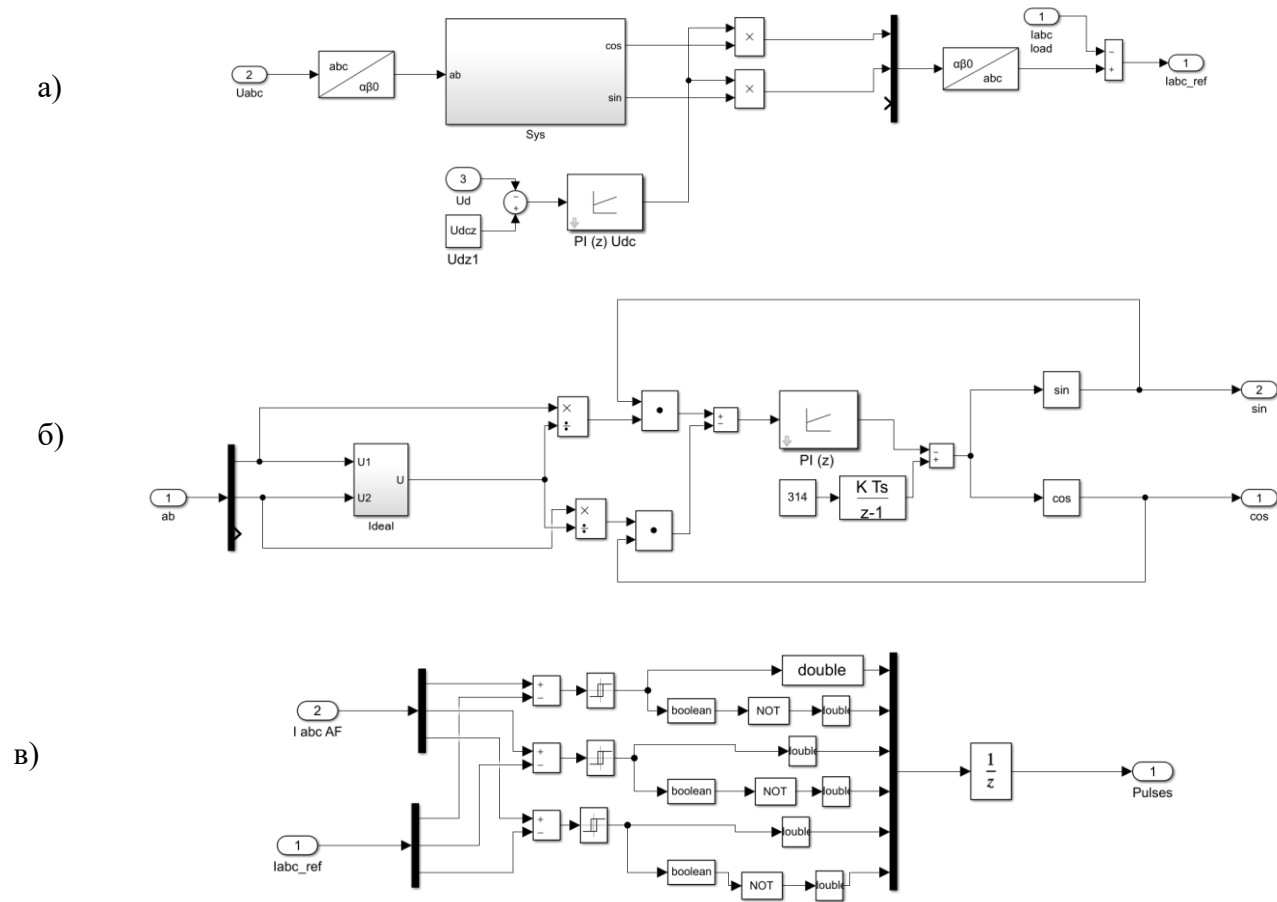


Рисунок 4.28 – Подсистемы управления АФВГ комбинированного ФКУ: а) – прямое и обратное преобразование Кларк; б) – вычисления значений $\cos\phi$; в) – релейного регулятора (выходной формирователь сигналов управления)

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

Результаты имитационного моделирования ЭТС выемочного участка при использовании различных видов ФКУ (ПФКУ, АФВГ, КФКУ) приведены в табличном, графическом и аналитическом виде.

Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения (K_U) и напряжение на вторичной обмотке понизительной подстанции энергопоезда выемочного участка, питающей забойный конвейер и перегружатель в зависимости от мощности пассивного ФКУ приведен в табл. 4.9. Данные табл. 4.9 показывают, что увеличение мощности ПФКУ $Q_{\text{ФКУ}}$, приводит к уменьшению K_U , в месте с этим увеличивается напряжение в питающей сети, превышающий допустимый уровень $1140 \pm 10\%V$.

Напряжение на вторичной обмотке понизительной подстанции энергопоезда выемочного участка, питающей забойный конвейер и перегружатель при определенной мощности ПФКУ (рис. 4.29) описывается выражением:

$$U = 56,037 \ln(Q_{\text{ФКУ}}) + 910,42. \quad (4.8)$$

Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения (K_U) на вторичной обмотке понизительной подстанции энергопоезда выемочного участка, питающей забойный конвейер и перегружатель при фиксированной мощности ПФКУ (рис. 4.30) описывается выражением:

$$K_U = 12,641 - 0,0087 * Q_{\text{ФКУ}}. \quad (4.9)$$

Исследование показывает, что применение ПФКУ для повышения ПКЭ в ЭТС выемочного участка обуславливает увеличение уровня питающей напряжения, выше допустимого значения.

Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения (K_U) и напряжение на вторичной обмотке понизительной подстанции энергопоезда выемочного участка, питающей забойный конвейер и перегружатель,

Таблица 4.9 – Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения (K_U) и напряжение на вторичной обмотке понизительной подстанции энергопоезда выемочного участка, питающей забойный конвейер и перегружатель, в зависимости от мощности пассивного ФКУ

$Q_{\text{ФКУ}}$, квар	ПФКУ	
	K_U , %	U , В
100	11,00	1141,84
150	10,70	1178,52
200	10,50	1199,42
250	10,20	1225,76
300	9,90	1246,19
350	9,70	1258,22
400	9,40	1263,41
450	9,10	1272,52
500	8,80	1275,52
550	8,40	1276,52
600	8,00	1277,52
650	7,50	1277,52
700	7,30	1277,52
750	6,60	1277,52
800	6,20	1277,52
850	5,30	1277,52
900	4,50	1277,52
950	3,30	1277,52
1000	2,40	1277,52

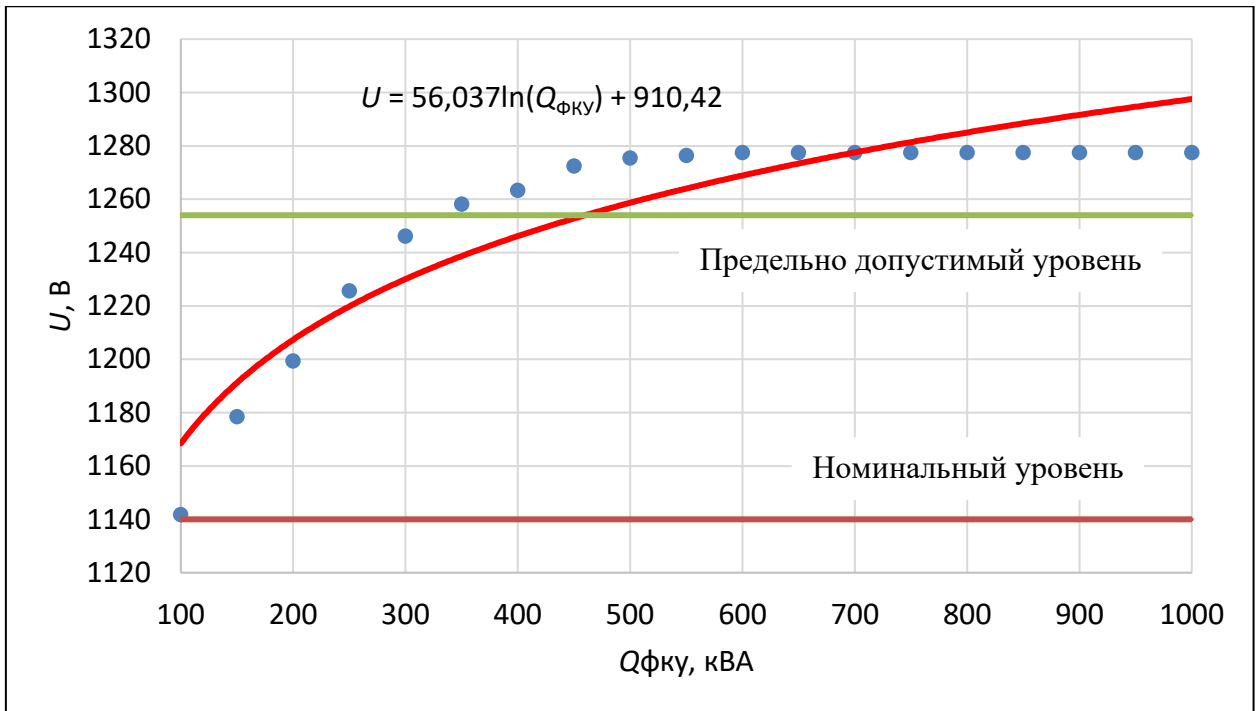


Рисунок 4.29 – Напряжение на вторичной обмотке понизительной подстанции энергопоезда выемочного участка, питающей забойный конвейер и перегружатель в зависимости от мощности пассивного ФКУ

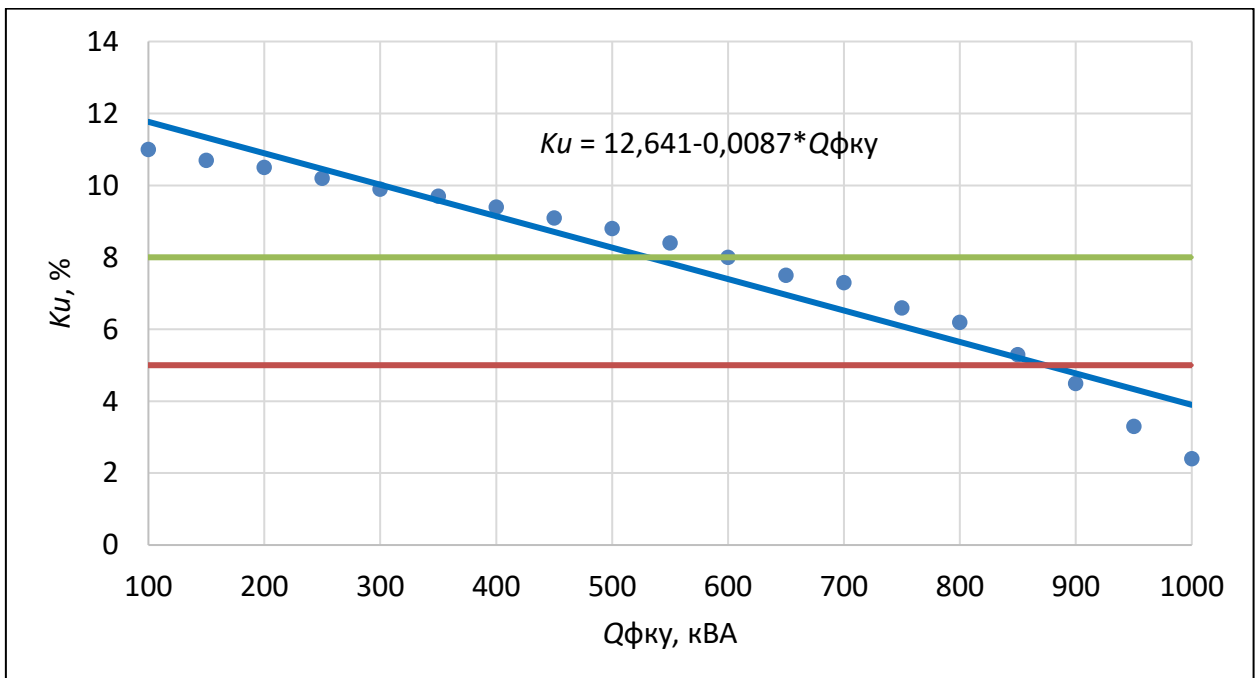


Рисунок 4.30 – Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения (K_U) на вторичной обмотке понизительной подстанции энергопоезда выемочного участка, питающей забойный конвейер и перегружатель в зависимости от мощности пассивного ФКУ

в зависимости от мощности нелинейной нагрузки при использовании АФВГ приведен в табл. 4.10.

Данные табл. 4.10 показывают, что увеличение мощности нелинейной нагрузки приводит к увеличению уровня суммарного коэффициент гармонических составляющих напряжения (K_U). Вместе с этим уровень напряжения в питающей сети находится в допустимом диапазоне $1140 \pm 10\%$ В. Применение АФВГ в подземных участковых электрических сетях возможно при мощности нелинейной нагрузки до 100 кВт.

Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения (K_U) на вторичной обмотке понизительной подстанции энергопоезда выемочного участка, питающей забойный конвейер и перегружатель при фиксированной мощности нелинейной нагрузки (рис. 4.31) описывается выражением:

$$K_U = 2,8027 + 0,0206 * P_{н.н.} \quad (4.10)$$

Уровень напряжения на вторичной обмотке понизительной подстанции энергопоезда выемочного участка, питающей забойный конвейер и перегружатель, при фиксированной мощности нелинейной нагрузки (рис. 4.32) описывается выражением:

$$U = 1174 - 0,0033 * P_{н.н.} \quad (4.11)$$

Вышеизложенное показывает, что применение АФВГ для обеспечения суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) до значения, требуемого ГОСТ 32144-2013 в ЭТС выемочного участка возможно только при мощности нелинейной мощности не более 250 кВт.

Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения (K_U) и напряжение на вторичной обмотке понизительной подстанции энергопоезда выемочного участка, питающей забойный конвейер и перегружатель в зависимости от мощности пассивного фильтра КФКУ приведен в табл. 4.11.

Данные табл. 4.11 показывают, что увеличение мощности пассивного фильтра КФКУ приводит к уменьшению K_U .

Таблица 4.10 – Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения (K_U) и напряжение на вторичной обмотке понизительной подстанции энергопоезда выемочного участка, питающей забойный конвейер и перегружатель, в зависимости от мощности нелинейной нагрузки при использовании АФВГ

Мощность нелинейной нагрузки, кВт	$K_U, \%$	$U, \text{В}$
100	5,62	1178,52
150	6,34	1165,72
200	6,51	1184,39
250	7,45	1172,78
300	8,08	1156,28
350	9,93	1181,23
400	10,92	1172,34
450	12,34	1166,89
500	13,78	1179,11

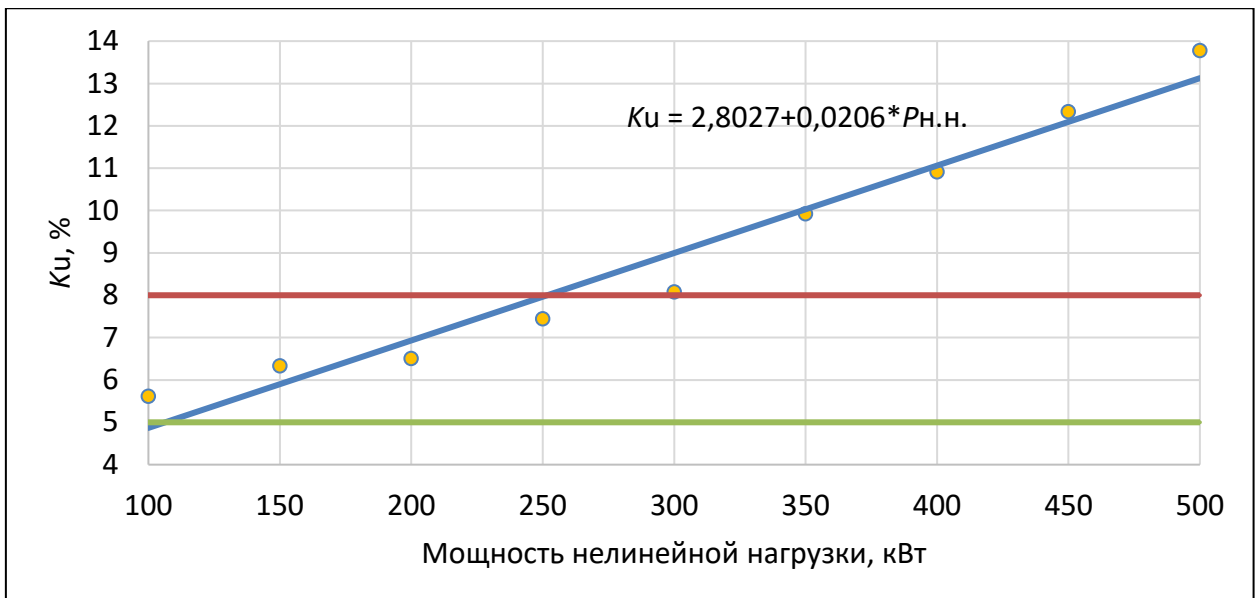


Рисунок 4.31 – Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения (K_U) на вторичной обмотке понизительной подстанции энергопоезда выемочного участка, питающей забойный конвейер и перегружатель, в зависимости от мощности нелинейной нагрузки при использовании АФВГ

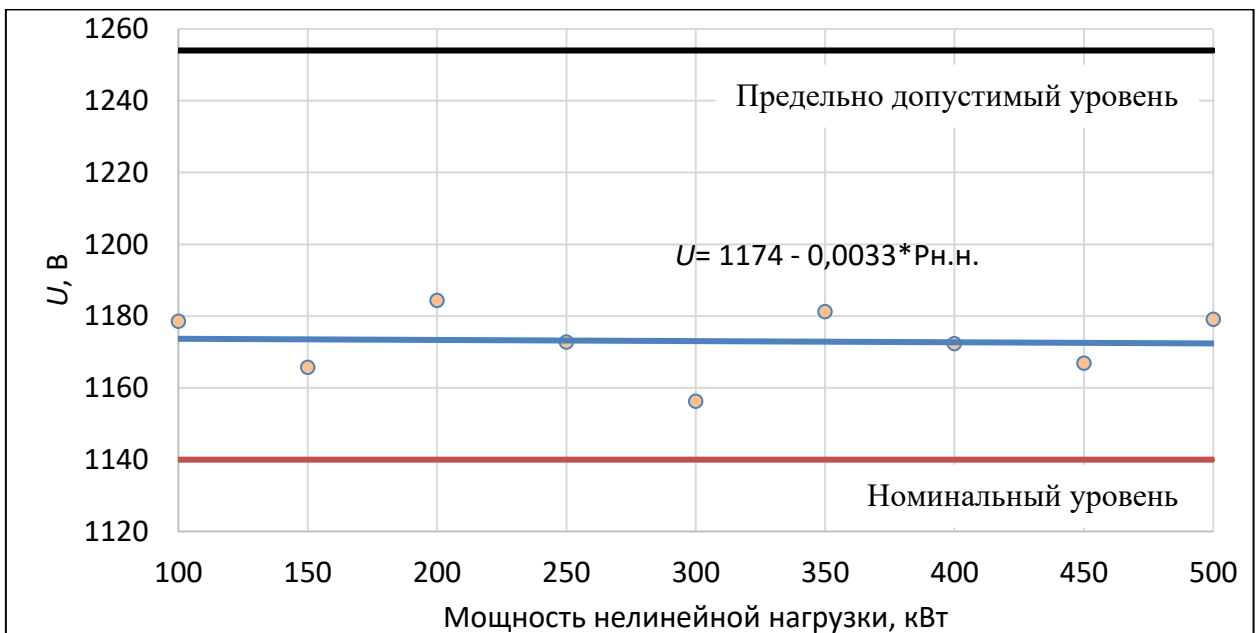


Рисунок 4.32 – Напряжение на вторичной обмотке понизительной подстанции энергопоезда выемочного участка, питающей забойный конвейер и перегружатель, в зависимости от мощности нелинейной нагрузки при использовании АФВГ

Таблица 4.11 – Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения (K_U) и напряжение на вторичной обмотке понизительной подстанции энергопоезда выемочного участка, питающей забойный конвейер и перегружатель, в зависимости от мощности пассивного фильтра КФКУ

$Q_{\text{ФКУ}}$, квар	КФКУ	
	K_U , %	U , В
100	9,35	1141,84
150	9,10	1153,63
200	8,93	1167,77
250	8,67	1181,98
300	8,42	1196,24
350	8,25	1201,01
400	7,99	1214,11
450	7,74	1217,53
500	7,48	1226,95
550	7,14	1231,40
600	6,80	1233,25
650	6,38	1237,46
700	6,21	1242,84
750	5,61	1243,02
800	5,27	1243,54
850	4,51	1246,76
900	3,83	1249,08
950	2,81	1249,95
1000	2,04	1250,67

Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения (K_U) на вторичной обмотке понизительной подстанции энергопоезда выемочного участка, питающей забойный конвейер и перегружатель при фиксированной мощности ПФКУ (рис. 4.33) описывается выражением:

$$K_U = 10,745 - 0,0074 * Q_{\text{фку}}. \quad (4.12)$$

Уровень напряжения на вторичной обмотке понизительной подстанции энергопоезда выемочного участка, питающей забойный конвейер и перегружатель при фиксированной мощности ПФ КФКУ (рис. 4.34) описывается выражением:

$$U = 51,644 \ln(Q_{\text{фку}}) + 900,21. \quad (4.13)$$

Вышеприведенные результаты показывают, что применение КФКУ для повышения ПКЭ в ЭТС выемочного участка обеспечивает снижение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U), при этом уровень напряжения находится в допустимом диапазоне $1140 \pm 10\% \text{В}$.

Проведенное исследование позволяет сделать заключение, что суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения (K_U) для электрических сетей напряжения 6 кВ, согласно ГОСТ 32144-2013, не должен превышать 5 %, а для электрических сетей напряжения 0,4 кВ не должен превышать 8 %, поэтому для электрических сетей с напряжением 1,14 кВ допустимое значение K_U при линейной итерации составляет 6,1 %.

Схема подключения КФКУ к электрической сети приведена на рис. 4.35.

Структурная схема комбинированного ФКУ приведена на рис. 4.36. В состав комбинированного ФКУ входит АФВГ с параллельным подключением к сети и емкостным накопителем состоящий из: входного дросселя $L_{\text{АФВГ}}$; трехфазного моста по схеме Ларионова, выполненный на биполярных транзисторах с изолированным затвором и демпферными диодами (VT1 – VT6); емкостной накопитель ($C_{\text{АФВГ}}$).

Принцип действия АФВГ состоит в генерировании компенсирующего тока в противофазе с током, искажающим форму синусоиду. В результате взаимодействия указанных токов происходит улучшение формы синусоиды

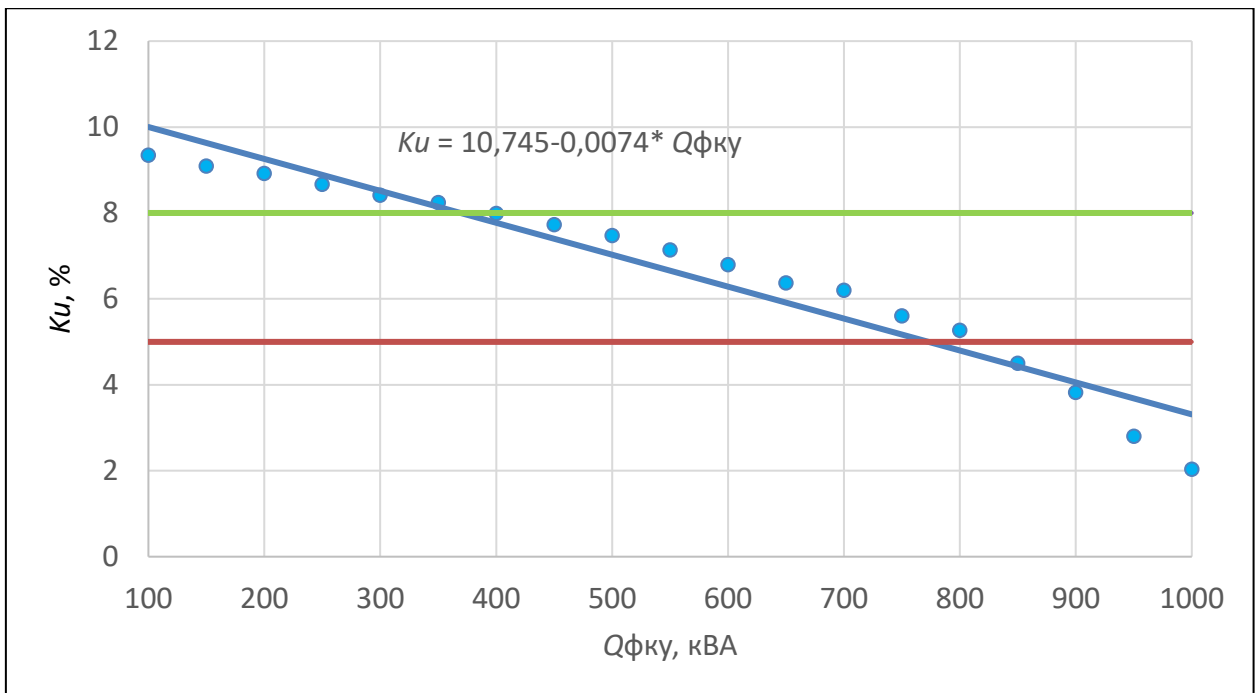


Рисунок 4.33 – Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения (K_U) на вторичной обмотке понизительной подстанции энергопоезда выемочного участка, питающей забойный конвейер и перегружатель, в зависимости от мощности ПФ КФКУ

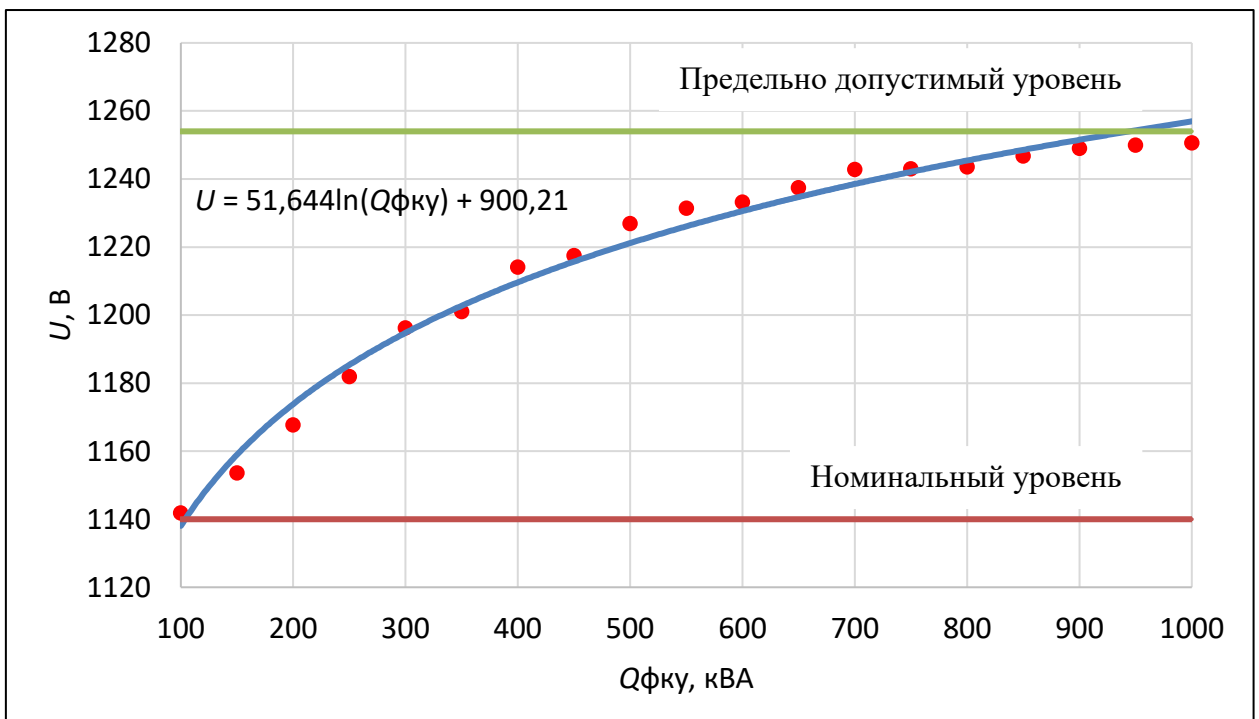


Рисунок 4.34 – Напряжение на вторичной обмотке понизительной подстанции энергопоезда выемочного участка, питающей забойный конвейер и перегружатель, в зависимости от мощности ПФ КФКУ

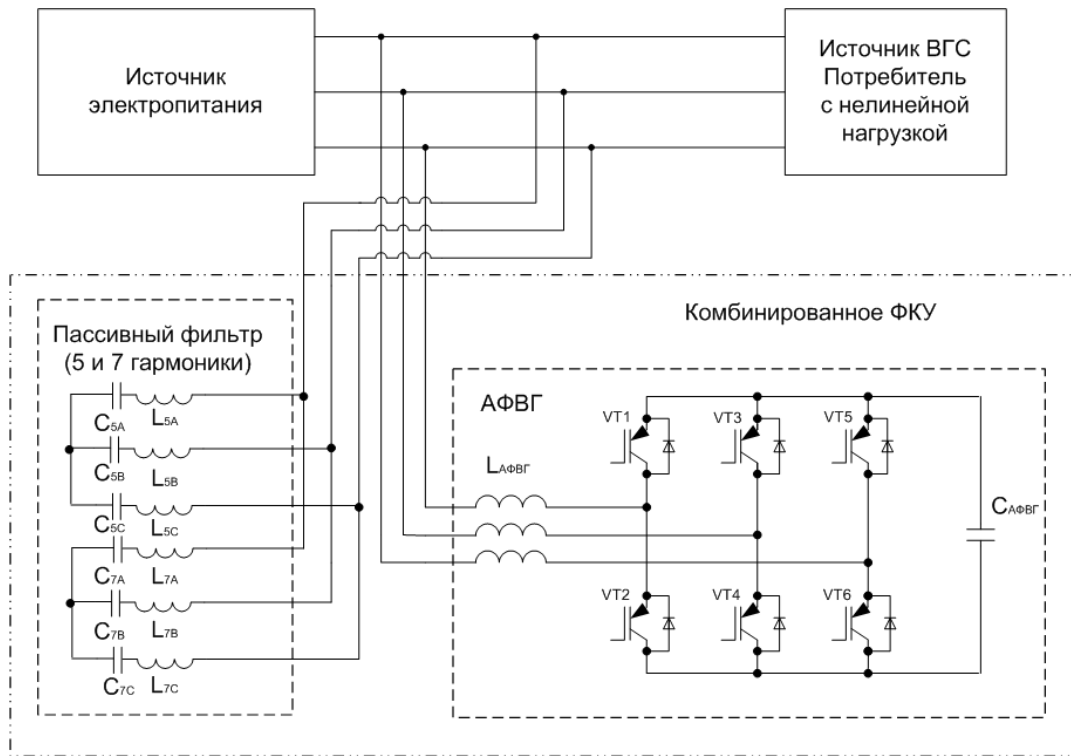


Рисунок 4.35 – Схема подключения КФКУ

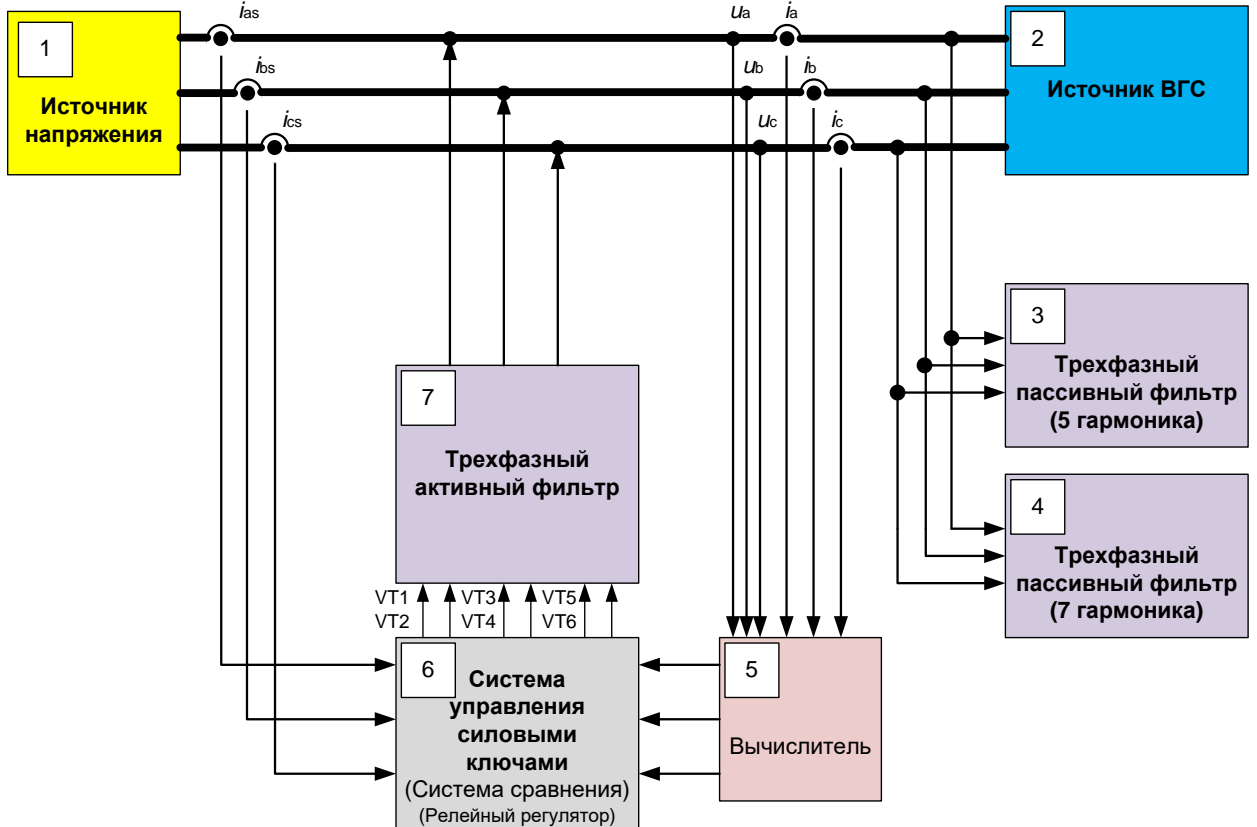


Рисунок 4.36 – Структурная схема КФКУ

путем взаимной компенсации и получения в результате тока синусоидальной формы без недопустимых искажений [33, 63, 172, 182].

КФКУ подключается между источником напряжения (1) и источником генерирования ВГС (2) (рис. 4.36).

На источнике напряжения (1) снимаются токовые сигналы (i_{as} , i_{bs} , i_{cs}). На источнике генерирования ВГС (2) снимаются сигналы тока (i_a , i_b , i_c) и напряжения (u_a , u_b , u_c), которые поступают в вычислитель для определения требуемых для компенсации значений тока АФВГ (5). Система управления силовыми ключами АФВГ (6) формирует сигналы, поступающие на биполярные транзисторы с изолированным затвором и демпферными диодами (VT1 – VT6).

В состав комбинированного ФКУ входят пассивные фильтры ВГС (3) и (4), настроенные на подавление 5-й и 7-й гармоник.

Расчет параметров АФВГ, являющегося элементом комбинированного ФКУ, осуществляется с использованием теории мгновенной мощности. Происходит определение мгновенной мощности путем трансформирования напряжения и токов трехфазной системы координат a , b , c в систему координат α , β , 0 - преобразование Кларк. Согласно преобразованию Кларк, мгновенные значения фазного напряжения и тока являются проекциями векторов a , b , c , смещенные относительно друг друга на 120° на неподвижные оси α и β , расположенных под углом 90° друг к другу [172, 182].

Последовательность вычисления сигналов управления АФВГ, следующая:

1. прямое преобразование Кларк напряжения и тока;
2. определяются значения мгновенной вещественной активной (p) и мгновенной мнимой реактивной мощности (q) в двухмерной системе координат (α , β);
3. определяется объем компенсации реактивной мощности в системе электроснабжения;

4. определяются мгновенные значения тока в двухмерной системе координат (α, β) с учетом компенсации реактивной мощности;
5. выполняется обратное преобразование Кларк токов двухмерной системы координат (α, β) в трехмерную при учете компенсации активной и реактивной мощности;
6. определяется разность между токами в нагрузке и токами, вычисленными в подпунктах 2 - 5;
7. происходит сравнение токов нагрузки и токов, вычисленными в подпунктах 2 - 5, в результате которого формируются сигналы управления биполярными транзисторами с изолированным затвором и демпферными диодами (VT1 – VT6) АФВГ [172, 182].

Емкость накопительного конденсатора АФВГ определяется по выражению [172, 182, 240]:

$$C = 2 \frac{\int_0^{T/12} (T_u + P_A) dt}{\Delta U_{dc} (\Delta U_{dc} + 2U_{dc})}, \quad (4.7)$$

где: C – емкость накопительного конденсатора, мкФ;

T – период сетевого напряжения.

T_u – мощность искажений на конденсаторе (выпрямленное напряжение), ВА;

P_A – мощность потерь на IGBT, ВА;

ΔU_{dc} – изменение выпрямленного напряжения, В;

U_{dc} – выпрямленное напряжение, В.

Индуктивность входного дросселя АФВГ определяется по выражению [172, 182]:

$$L = \frac{\Delta U}{2\pi f I}, \quad (4.8)$$

где: ΔU – потери напряжения на дросселе, В;

f – частота питающей сети, Гц;

I – ток, А;

L – индуктивность, Гн.

Значение индуктивности входного дросселя АФВГ определяется с учетом того, что $I = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U}$ по выражению:

$$L = \frac{\sqrt{3}U\Delta U}{2\pi fS}. \quad (4.9)$$

Имитационная модель ЭТС выемочного участка с КФКУ, сформированная на основе схемы ЭТС выемочного участка (рис.4.3) и приеденная на рис. 4.27 позволяет провести исследование режимов генерирования ВГС в подземных участковых электрических сетях с учетом включенного и отключенного состояния.

4.5 Исследование режимов генерирования высших гармонических составляющих в подземных участковых электротехнических системах с применением комбинированных фильтрокомпенсирующих устройств

Моделирование режимов генерирования ВГС в подземных участковых ЭТС проводилось с выключенным и включенным комбинированным ФКУ. В результате получены: осциллограммы амплитудных значений напряжения; гармонический состав напряжения; суммарные коэффициенты гармонических составляющих напряжения (K_U) [134, 169].

Результаты моделирования режимов генерирования ВГС в подземных участковых ЭТС угольных шахт при выключенном комбинированном ФКУ приведены в виде осциллограмм:

рис. 4.37а - напряжение на вторичной обмотке понизительной подстанции энергопоезда, питающей забойный конвейер и перегружатель;

рис. 4.37б - напряжение на накопительной емкости АФВГ комбинированного ФКУ.

В качестве примера на рис. 4.38 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. При этом значение напряжения составляет 1670 В, значение K_U составляет 10,59 %. Вывод, генерирование ВГС забойным конвейером и перегружателем превышает допустимый предел согласно ГОСТ 32144-2013 и требуется установка ФКУ на вторичной обмотке понизительной подстанции энергопоезда питающих эти электропотребители.

Вышеприведенные результаты исследования режимов генерирования ВГС показывают, что требуется установка комбинированного ФКУ в ЭТС выемочного участка, включенного после вторичной обмотки понизительной подстанции энергопоезда, питающей забойный конвейер и перегружатель.

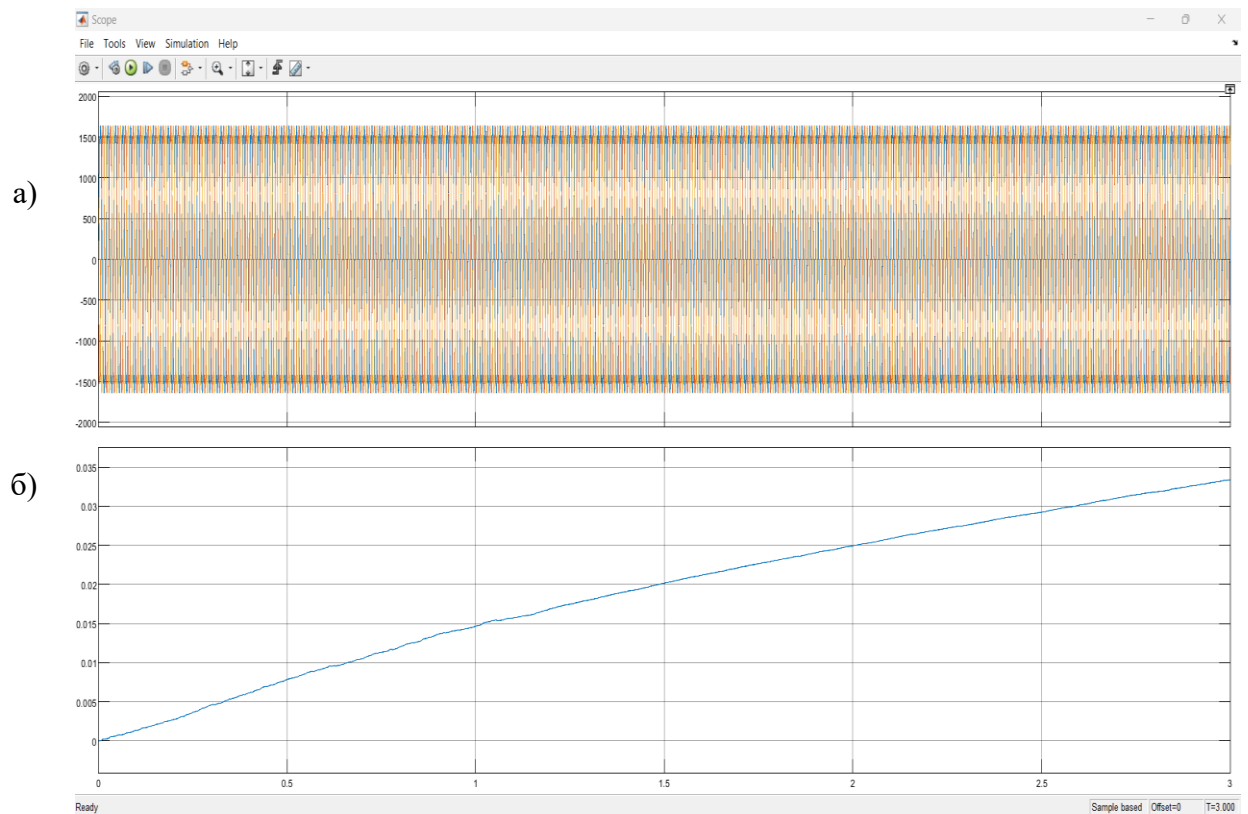


Рисунок 4.37 – Осциллограммы напряжения при отключенном комбинированном ФКУ:

- а) - напряжение во вторичной обмотке понизительной подстанции энергопоезда, питающей забойный конвейер и перегружатель;
- б) - напряжение накопительной емкости АФВГ комбинированного ФКУ

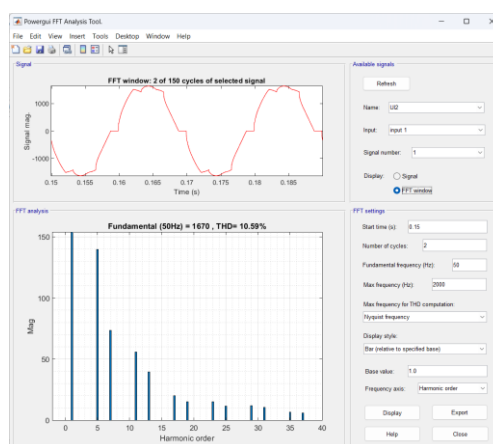


Рисунок 4.38 - Синусоида напряжения с искажениями, гармонический состав и суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения на вторичной обмотке понизительной подстанции энергопоезда, питающей забойный конвейер и перегружатель при отключенном КФКУ

Результаты моделирования режимов генерирования ВГС в подземных участковых ЭТС угольных шахт при включенном комбинированном ФКУ приведены в виде осциллограмм:

рис. 4.39а - напряжение на вторичной обмотке понизительной подстанции энергопоезда, питающей забойный конвейер и перегружатель;

рис. 4.39б - напряжение на накопительной емкости АФВГ комбинированного ФКУ.

В качестве примера на рис. 4.40 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. При этом значение напряжения составляет 1704 В, значение K_U составляет 6,54 %.

Результаты имитационного моделирования приведены в табличном, графическом виде. Зависимость гармонических составляющих напряжения (K_U) на вторичной обмотке понизительной подстанции энергопоезда, питающей забойный конвейер и перегружатель от мощностей нелинейной нагрузки и ПФ КФКУ приведена в табл. 4.12. Данные табл. 4.12 показывают, что увеличение мощности нелинейной нагрузки ($P_{н.н.}$) для определенных значений мощности ПФ КФКУ ($Q_{пф кфку}$) приводит к увеличению K_U .

Геометрической интерпретацией зависимости K_U на вторичной обмотке понизительной подстанции энергопоезда, питающей забойный конвейер и перегружатель в зависимости от мощностей нелинейной нагрузки и ПФ КФКУ является поверхность в трехмерном пространстве, приведенная на рис. 4.41.

Эмпирические зависимости для оценки суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) в подземных участковых электрических сетях угольных шахт с учетом мощностей нелинейной нагрузки ($P_{н.н.}$) и ПФ КФКУ ($Q_{фку}$) приведены в табл. 4.13.

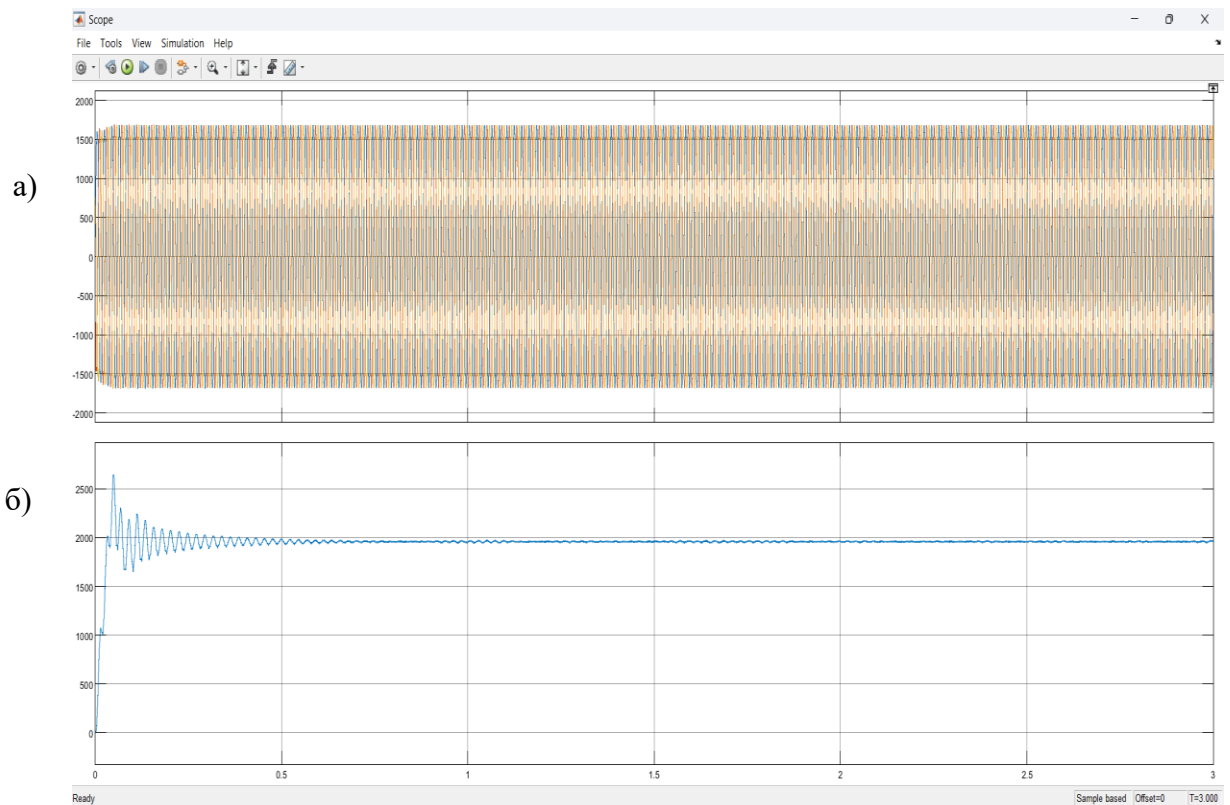


Рисунок 4.39 – Осциллограммы напряжения при включенном комбинированном ФКУ

- а) - напряжение во вторичной обмотке понизительной подстанции энергопоезда, питающей забойный конвейер и перегружатель;
- б) - напряжение накопительной емкости АФВГ комбинированного ФКУ

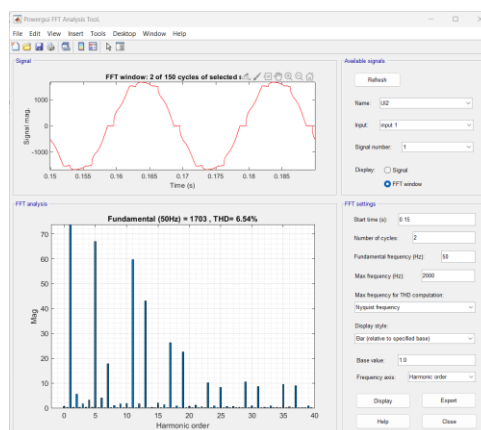


Рисунок 4.40 - Синусоида напряжения с искажениями, гармонический состав и суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения на вторичной обмотке понизительной подстанции энергопоезда, питающей забойный конвейер и перегружатель с включенным комбинированным ФК

Таблица 4.12 – Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения (K_U) на вторичной обмотке понизительной подстанции энергопоезда, питающей забойный конвейер и перегружатель, в зависимости от мощностей нелинейной нагрузки и ПФ КФКУ

Мощность ПФ КФКУ, квар	Мощность нелинейной нагрузки кВт, ($U=1,14$ кВ)							
	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000
100	2,1	5,8	10,1	12,4	14,6	15,8	17,3	18,1
200	2,0	5,4	9,4	11,6	13,7	14,7	16,1	16,9
300	1,9	5,1	8,8	10,8	12,8	13,6	14,9	15,7
400	1,7	4,7	8,1	10,0	11,9	12,5	13,7	14,5
500	1,6	4,3	7,4	9,2	11,0	11,4	12,5	13,3
600	1,4	3,9	6,8	8,4	10,1	10,3	11,3	12,1
700	1,3	3,5	6,1	7,6	9,2	9,2	10,1	10,9
800	1,2	3,2	5,5	6,8	8,3	8,1	8,9	9,7
900	1,0	2,8	4,8	6,0	7,4	7,0	7,7	8,5
1000	0,9	2,4	4,1	5,2	6,5	5,9	6,5	7,3

Цветом выделены значения превышающие требуемые значение K_U , равное 8 %.

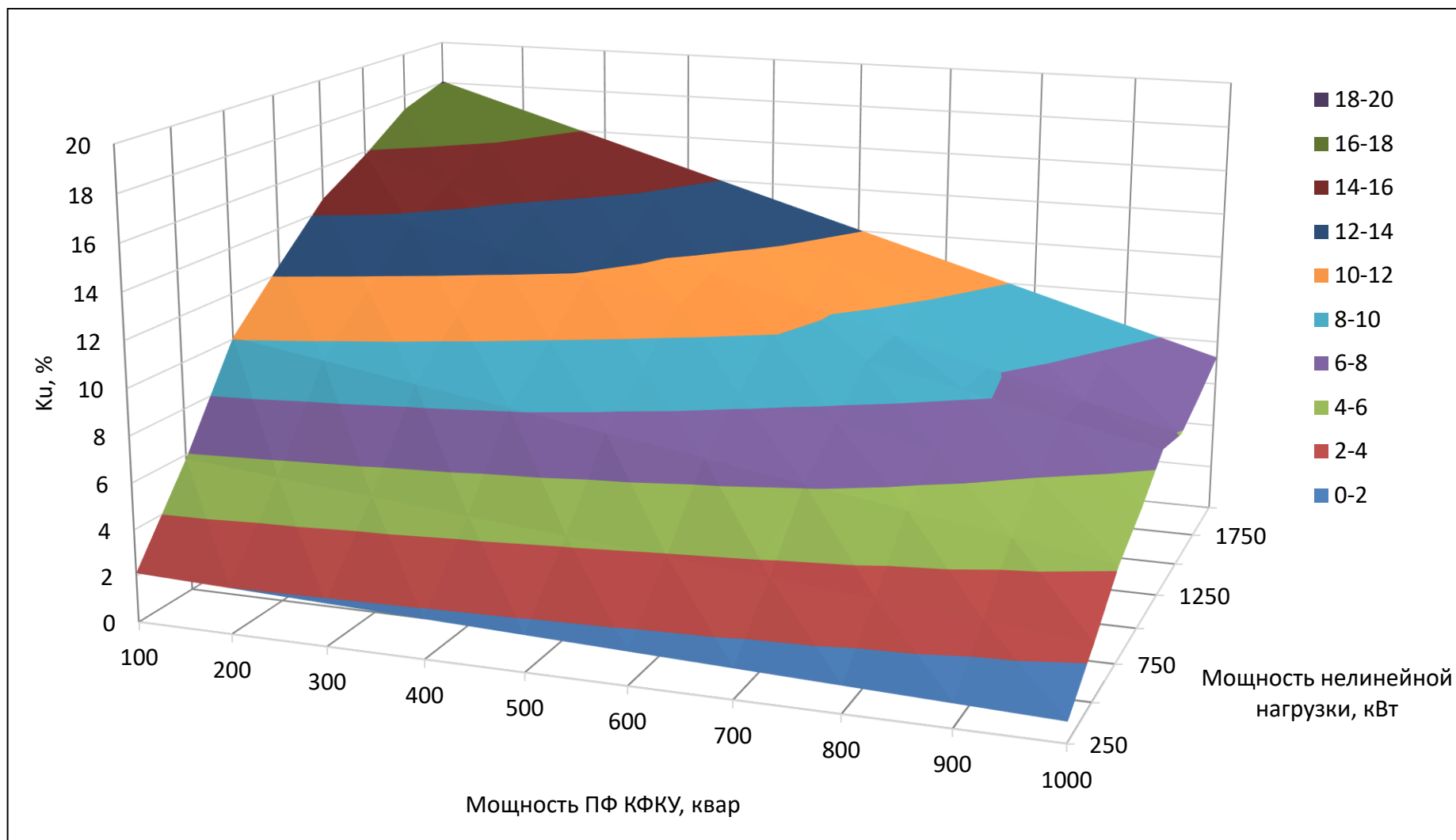


Рисунок 4.41 - Геометрическая интерпретация зависимости суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) от мощностей нелинейной нагрузки ($P_{н.н.}$) и ПФ КФКУ ($Q_{пф кфку}$), $K_U = f(P_{н.н.}, Q_{пф кфку})$

Таблицу 4.13 - Эмпирические зависимости для оценки суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) в подземных участковых электрических сетях угольных шахт с учетом мощностей нелинейной нагрузки ($P_{н.н}$) и ПФ КФКУ ($Q_{фку}$)

$K_U = f(Q_{фку}, P_{н.н} = const)$			$K_U = f(P_{н.н}, Q_{фку} = const)$		
$P_{н.н}$, кВт	Эмпирическая зависимость	\bar{A} , %	$Q_{фку}$, квар	Эмпирическая зависимость	\bar{A} , %
250	$K_U = 2,270 - 0,0014 * Q_{фку}$	4,834	100	$K_U = 8,055 * \ln(P_{н.н}) - 43,125$	7,614
500	$K_U = 6,205 - 0,0038 * Q_{фку}$	4,764	200	$K_U = 7,500 * \ln(P_{н.н}) - 40,126$	7,755
750	$K_U = 10,740 - 0,0065 * Q_{фку}$	4,794	300	$K_U = 6,920 * \ln(P_{н.н}) - 36,932$	7,284
1000	$K_U = 13,165 - 0,0080 * Q_{фку}$	4,871	400	$K_U = 6,404 * \ln(P_{н.н}) - 32,208$	7,277
1250	$K_U = 15,460 - 0,0090 * Q_{фку}$	4,810	500	$K_U = 5,983 * \ln(P_{н.н}) - 32,036$	7,839
1500	$K_U = 16,945 - 0,011 * Q_{фку}$	4,783	600	$K_U = 5,326 * \ln(P_{н.н}) - 28,428$	7,389
1750	$K_U = 18,545 - 0,012 * Q_{фку}$	4,803	700	$K_U = 4,771 * \ln(P_{н.н}) - 25,429$	7,900
2000	$K_U = 19,265 - 0,012 * Q_{фку}$	4,797	800	$K_U = 4,191 * \ln(P_{н.н}) - 22,235$	7,416
			900	$K_U = 3,675 * \ln(P_{н.н}) - 19,511$	7,775
			1000	$K_U = 2,674 * \ln(P_{н.н}) - 14,317$	7,795

Зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) от мощностей нелинейной нагрузки ($P_{н.н.}$) и ПФ КФКУ ($Q_{пф.кфку}$) при значении ($P_{н.н.} = 1000$ кВт) (рис. 4.42) описывается выражением:

$$K_U = 13,165 - 0,0080 * Q_{фку}. \quad (4.10)$$

Зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) от мощностей нелинейной нагрузки ($P_{н.н.}$) и ПФ КФКУ ($Q_{пф.кфку}$) при значении ($Q_{пф.кфку} = 500$ квар) (рис. 4.43) описывается выражением:

$$K_U = 5,983 * \ln(P_{н.н.}) - 32,036 \quad (4.11)$$

Данные табл. 4.12 показывают, что суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения (K_U) находится диапазоне от 0,9 до 18,1 %.

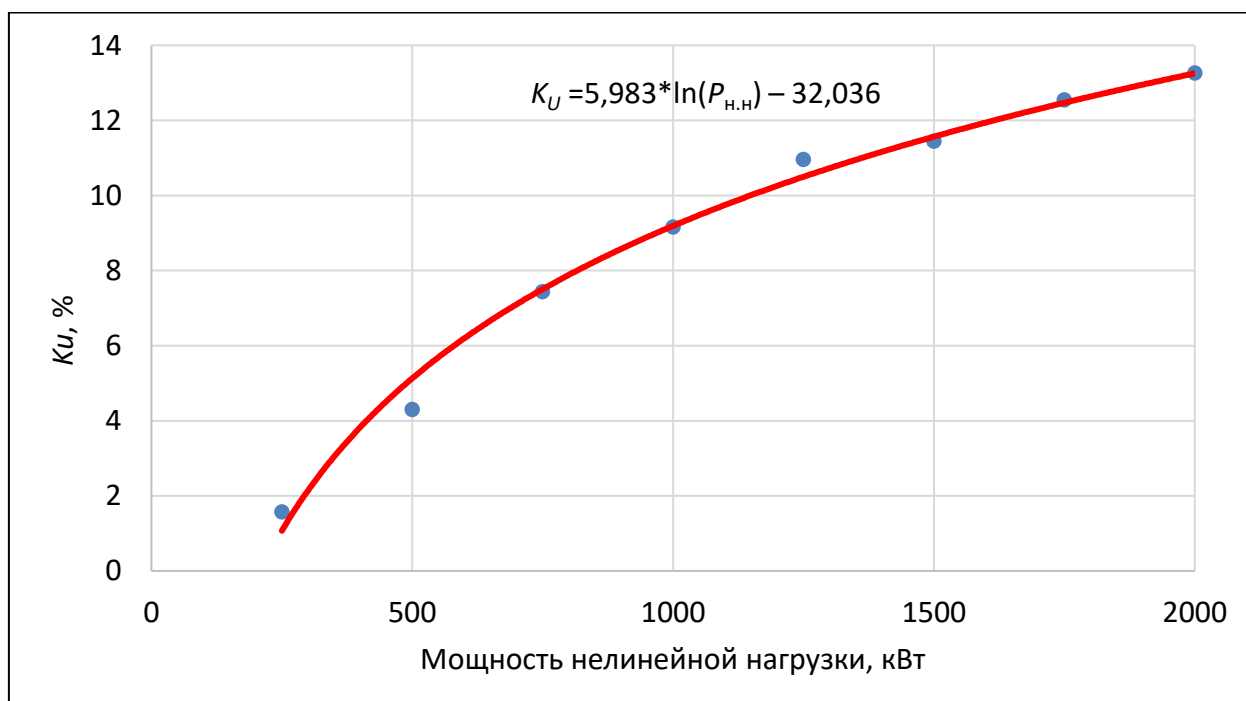


Рисунок 4.42 - Зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) от мощностей нелинейной нагрузки ($P_{н.н.}$) и ПФ КФКУ ($Q_{пф.кфку}$) при значении ($P_{н.н.} = 1000$ кВт)

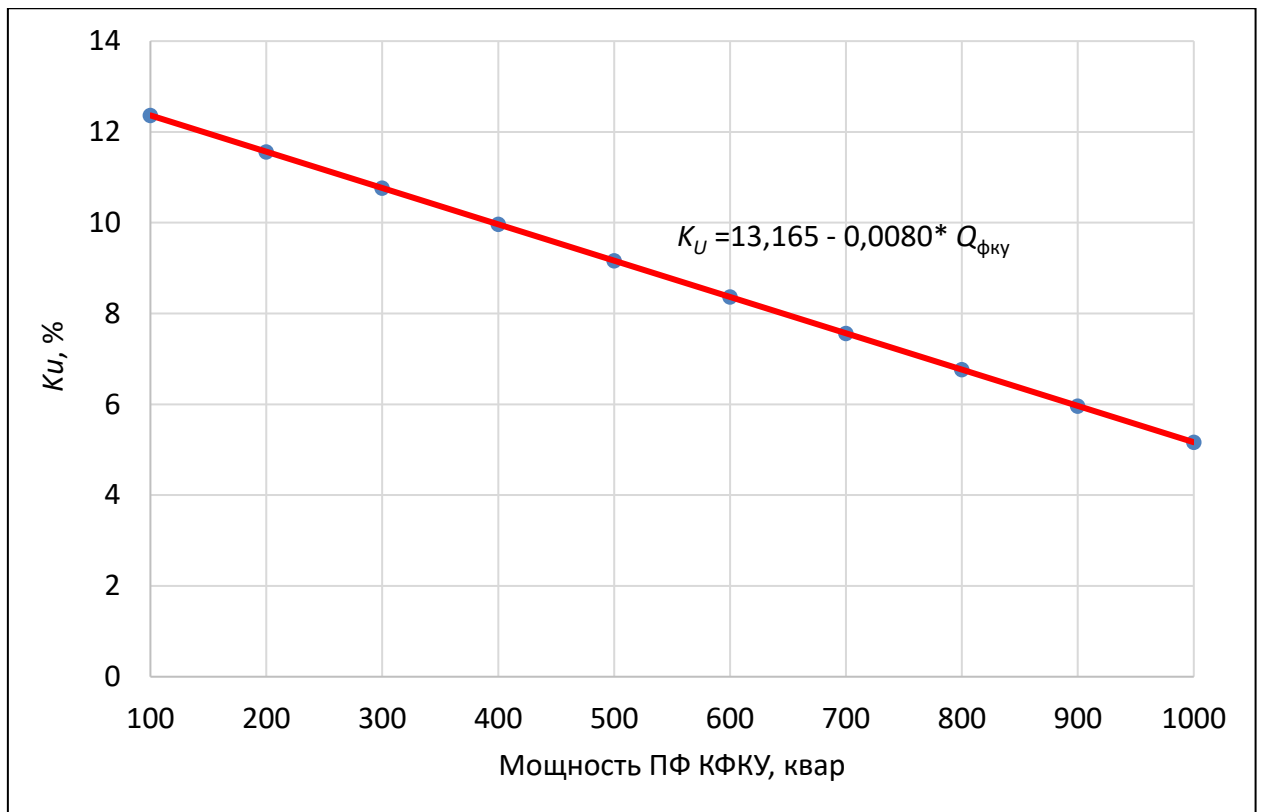


Рисунок 4.43 - Зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) от мощностей нелинейной нагрузки ($P_{н.н.}$) и ПФ КФКУ ($Q_{\text{пф.кфку}}$) при значении ($Q_{\text{пф.кфку}} = 500$ квар)

Для приведенных эмпирических зависимостей, выполнена оценка значения средней ошибки аппроксимации по шкале Чеддока, которая характеризуется очень высокой точностью, так как полученные значения находящиеся в диапазоне ($0\% < \bar{A} < 10\%$).

Анализ результатов моделирования генерирования ВГС в подземных участковых ЭТС угольных шахт при отключенном и включенном комбинированном ФКУ на вторичной обмотке понизительной подстанции энергопоезда, питающей забойный конвейер и перегружатель приведен в табл. 4.14.

Таблица 4.14 – Сравнение результатов моделирования режимов генерирования ВГС в подземных участковых ЭТС при отключенном и включенном комбинированном ФКУ, установленном на выходе понизительной подстанции энергопоезда, питающей забойный конвейер и перегружатель

Показатели	Состояние КФКУ		Разность		Δ , %
	Откл.	Вкл.	Повышение	Снижение	
Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения K_U , %	10,59	6,54	-	4,05	38,24 %
Напряжение, В	1670	1703	33	-	1,98 %
Ток, А	344	354	10	-	2,91 %

В отключенном состоянии комбинированного ФКУ значения суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) на вторичной обмотке понизительной подстанции энергопоезда, питающей забойный конвейер и перегружатель составлял 10,59% (рис. 5.43), после подключения комбинированного ФКУ показатель K_U составил 6,54%, что подтвердило эффективность его работы. 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 $\pm 10\%$.

Сравнительный анализ точности моделирования ЭТС технологических электропотребителей выемочного участка угольной шахты приведен в табл. 4.15.

Таблица 4.15 - Оценка сходимости результатов имитационного моделирования режимов генерирования ВГС преобразовательными устройствами систем управления электроприводами оборудования выемочного участка с результатами экспериментальных исследований

Вид оборудования	Напряжение, кВ		Ток, А		Сходимость
	Экспериментальное исследование	Моделирование	Экспериментальное исследование	Моделирование	
Выемочный комбайн	3,28	3,30	232,02	249,25	0,93
Забойный конвейер	1,14	1,14	377,79	402,11	0,91
Дробилка	1,15	1,14	135,72	149,07	0,90
Перегрузжатель	1,14	1,14	37,69	42,43	0,90

Данные табл. 4.15 показывает, что сходимость результатов, моделирования с результатами экспериментальных исследований, приведенных в табл. 2.5, находится уровне 0,90 - 0,93.

Относительная погрешность моделирования оценивалась по формуле [155]:

$$\delta = 100 \left| \frac{x-X}{X} \right|, \quad (4.10)$$

где x – значение, полученное в ходе имитационного моделирования; X – значение, полученное в ходе проведенного эксперимента.

Данные табл. 4.16 показывает, что погрешность моделирования ЭТС технологических электропотребителей выемочного участка угольной шахты находится в диапазоне от 0,09 до 12,58 %, что является допустимым значением.

Таблица 4.16 – Сравнительный анализ точности моделирования ЭТС технологических электропотребителей выемочного участка угольной шахты

№	Электропотребитель	Показатель	Экспериментальное значение	Значение, полученное в ходе моделирования	δ , %
1	Выемочный комбайн	Напряжение, кВ	3,280	3,300	0,61
		Ток, А	232,020	249,250	7,43
2	Забойный конвейер	Напряжение, кВ	1,139	1,140	0,09
		Ток, А	377,790	402,110	6,44
3	Дробилка	Напряжение, кВ	1,154	1,140	1,21
		Ток, А	135,720	149,070	9,84
4	Перегружатель	Напряжение, кВ	1,139	1,140	0,09
		Ток, А	37,690	42,430	12,58

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.

Проведенное в главе исследование доказывает эффективность использования комбинированного ФКУ и обуславливает необходимость разработки технического устройства на его основе для подземных участковых ЭТС угольных шахт.

4.6 Выводы

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 %.

Глава 5. Исследование режимов генерирования высших гармонических составляющих в электрических сетях угольных шахт для обоснования параметров и применения фильтрокомпенсирующих устройств

5.1 Имитационные модели электротехнических систем угольных шахт для исследования режимов генерирования высших гармонических составляющих

На основании анализа ЭТС угольных шахт Кузнецкого, Донецкого, Воркутинского и Карагандинского угольных бассейнов определены наиболее распространенные ЭТС. На угольных шахтах широкое распространение получили совмещенные ЭТС [116].

Совмещенная ЭТС угольной шахты с применением двухобмоточных трансформаторов на ГПП приведена на рис. 5.1. Электроэнергия поступает на ГПП угольной шахты от двух независимых источников напряжением 110 или 35 кВ и трансформируется до 6 кВ. От шин ГПП 6 кВ запитаны электропотребители поверхностного и подземного комплексов угольной шахты. На флангах шахтного поля расположены скважины, через которые по кабельным линиям осуществляется электроснабжение подземных электропотребителей, расположенных отдаленно от центрального ствола шахты [116, 182, 188].

Совмещенная ЭТС угольной шахты с применением трехобмоточных трансформаторов на ГПП приведена на рис. 5.2. Электроэнергия поступает на ГПП угольной шахты от двух независимых источников напряжением 110 кВ и трансформируется до 35 кВ и 6 кВ. От шин ГПП 6 кВ запитаны электропотребители подземного комплекса. От шин ГПП 35 кВ электроэнергия трансформируется до напряжения 6 кВ и поступает к электропотребителям поверхностного комплекса угольной шахты.

На флангах шахтного поля расположены скважины, через которые по кабельным линиям осуществляется электроснабжение подземных электропотребителей, расположенных отдаленно от центрального шахтного ствола [116, 182, 188].

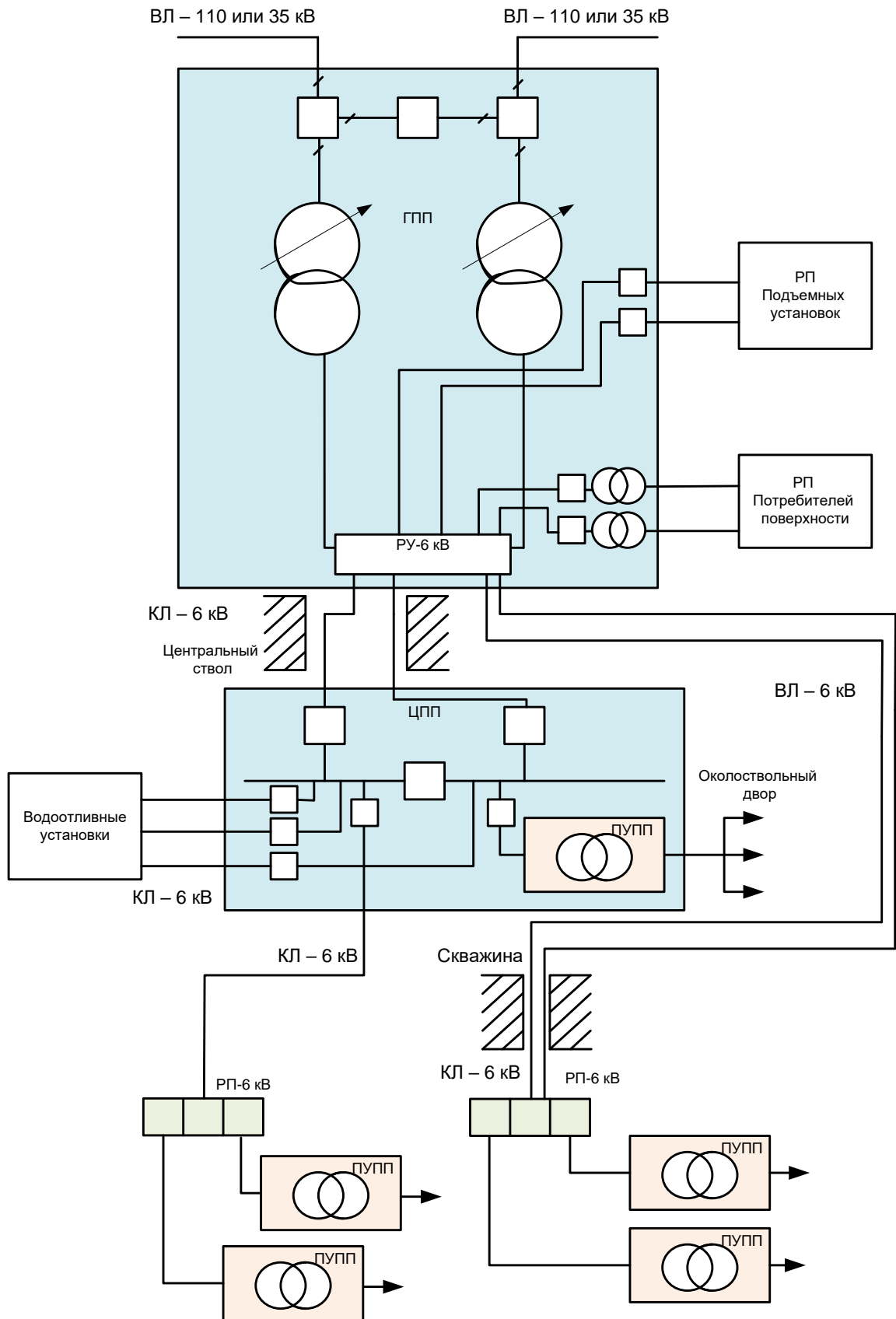


Рисунок 5.1 – Совмещенная через центральный ствол и скважину структурная схема электроснабжения угольной шахты с двухмоточными трансформаторами на ГПП

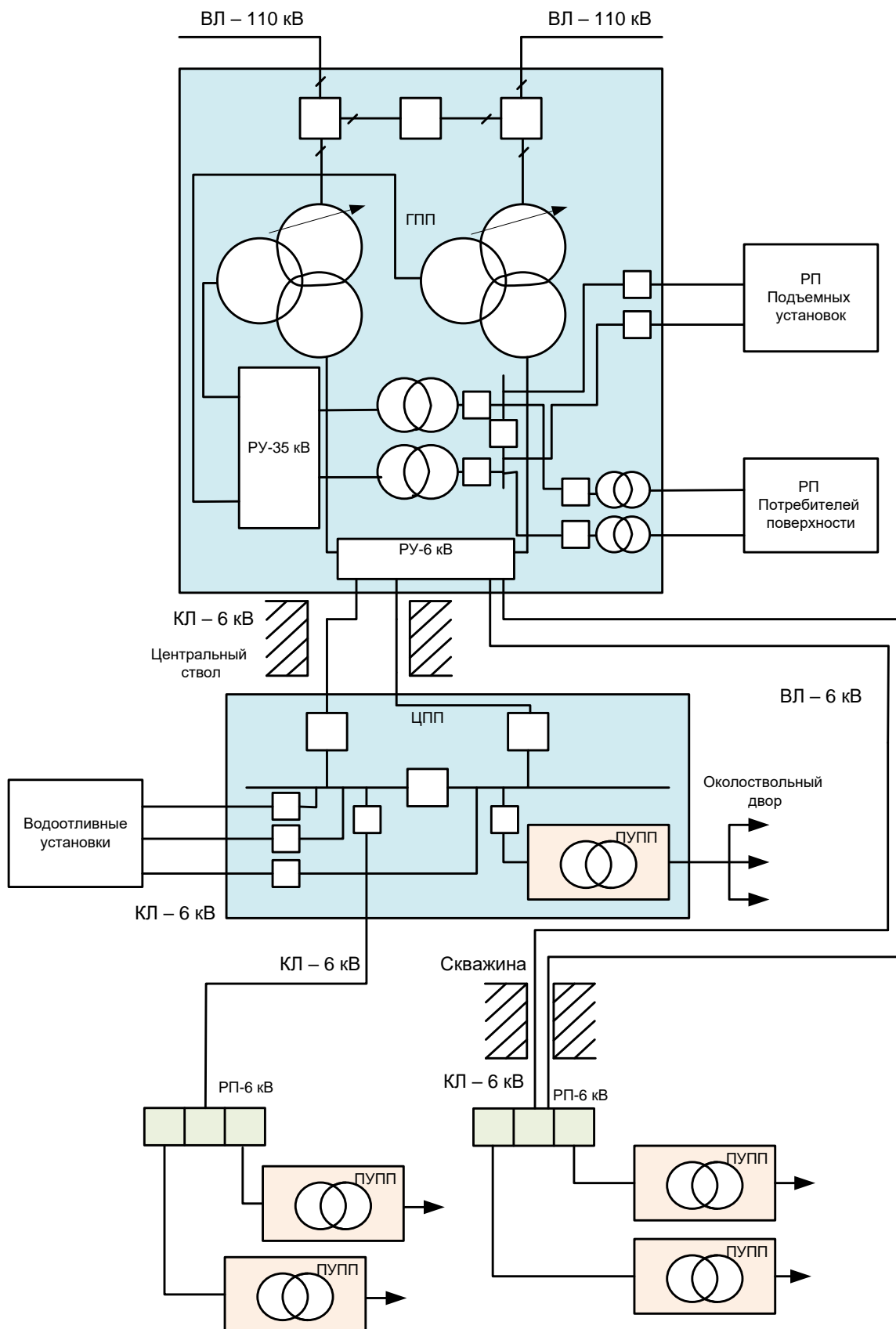


Рисунок 5.2 – Совмещенная через центральный ствол и скважину структурная схема электроснабжения угольной шахты с трехмоточными трансформаторами на ГПП

Совокупность схемы электроснабжения и электроприемников угольной шахты представляется как ЭТС. В дальнейших исследованиях при разработке имитационных моделей режимов генерирования ВГС приняты ЭТС угольных шахт с электроснабжением электроприемников поверхностного комплекса напрямую от РУ-6 кВ, подземного комплекса от РУ-6 кВ через центральный ствол и скважину.

Структура ЭТС угольной шахты с двухобмоточными трансформаторами на ГПП для формирования имитационной модели приведена на рис. 5.3. ЭТС включает: два источника электроэнергии напряжением 35 или 110 кВ; два силовых двухобмоточных трансформатора 110/6 или 35/6 кВ; два трансформатора 6/0,4 кВ; высоковольтные и низковольтные коммутационные аппараты; воздушные и кабельные линии; электропотребители поверхностного и подземного комплексов.

Структура ЭТС угольной шахты с трехобмоточными трансформаторами на ГПП для формирования имитационной модели приведена на рис. 5.4, включает: два источника электроэнергии напряжения 110 кВ; два трехобмоточных силовых трансформатора 110/35/6 кВ; два трансформатора 35/6 кВ; два трансформатора 6/0,4 кВ; высоковольтные и низковольтные коммутационные аппараты; воздушные и кабельные линии; электропотребители поверхностного и подземного комплексов.

Спецификация элементов ЭТС угольной шахты приведена в табл. 5.1.

Приведенные на рис. 5.3 и 5.4 структуры ЭТС положены в основу построения имитационных моделей ЭТС угольной шахты для исследования режимов генерирования ВГС и ограничения их значения с применением ФКУ.

Имитационное моделирование ЭТС угольной шахты с выполнено с использованием программного продукта *Matlab*, директорий *Simulink*, *SimScape*. Исследование режимов генерирования ВГС в ЭТС проведено в соответствии с Методикой имитационного моделирования режимов генерирования ВГС в ЭТС угольных шахт (п. 3.3).

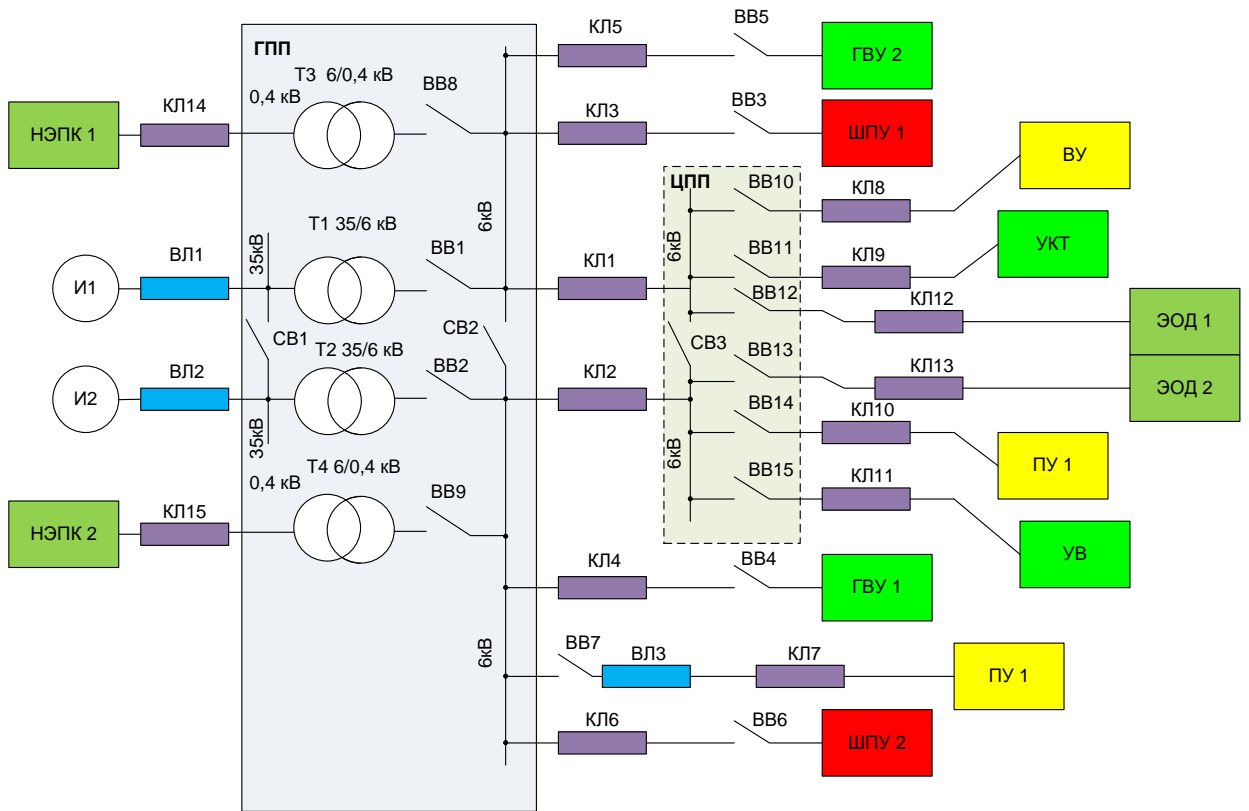


Рисунок 5.3 – Структура ЭТС угольной шахты с двухобмоточными трансформаторами на ГПП

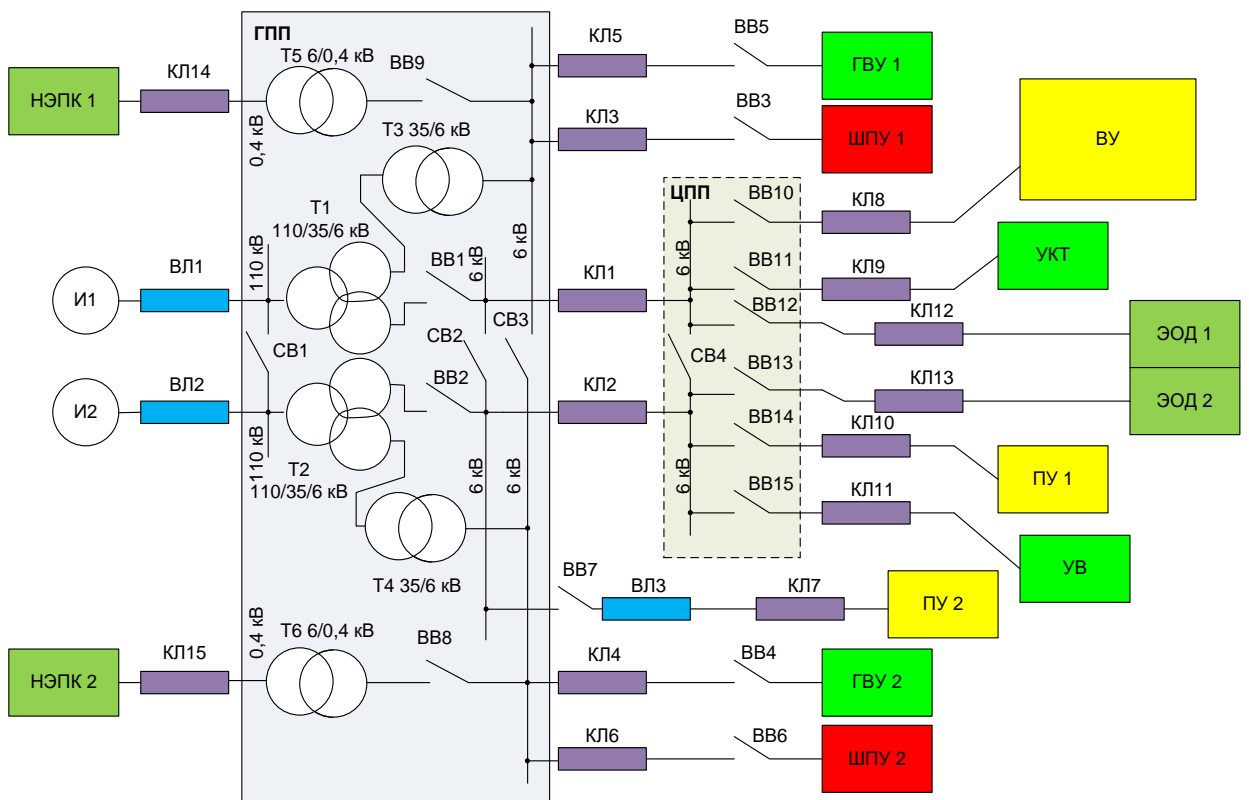


Рисунок 5.4 - Структура ЭТС угольной шахты с трехобмоточными трансформаторами на ГПП

Таблица 5.1 - Спецификация элементов ЭТС угольной шахты

И 1	Источник высокого напряжения угольной шахты 1
И 2	Источник высокого напряжения угольной шахты 2
НЭПК 1	Низковольтные электропотребителей поверхностного комплекса, фидер 1
НЭПК 2	Низковольтных электропотребителей поверхностного комплекса, фидер 2
ГПП	Главная понизительная подстанция
ЦПП	Центральная подземная подстанция
ГВУ 1	Главная вентиляционная установка № 1
ГВУ 2	Главная вентиляционная 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 водоотведения
ЭОД 1	Электропотребители околоствольного двора, ввод 1
ЭОД 2	Электропотребители околоствольного двора, ввод 2
СВ	Секционный выключатель
ВВ	Высоковольтный выключатель
КЛ	Кабельная линия
ВЛ	Воздушная линия

Имитационная модель ЭТС угольной шахты с двухобмоточными трансформаторами на ГПП для исследования режимов ВГС в электрических сетях подземного и поверхностного комплексов, приведенная на рис. 5.5, состоит из: двух источников электроэнергии; двух двухобмоточных трансформаторов; ПФ ВГС, настроенных на подавление 5, 7, 11 и 13 высших гармоник; кабельных и воздушных линий; коммутационных аппаратов; блоков для измерения суммарных значений коэффициентов K_U и K_I ; осциллографов. В модели имеются подсистемы, которые имитируют режимы работы оборудования отдельных линейных и нелинейных технологических электропротребителей, а также участков угольной шахты: главная вентиляционная установка (ГВУ 1, ГВУ 2); шахтные подъемные установки (ШПУ 1, ШПУ 2); выемочный участок (ВУ); участок конвейерного транспорта (УКТ); проходческие участки (ПУ 1, ПУ 2); участок водоотлива (УВ).

Имитационная модель ЭТС угольной шахты с трехобмоточными трансформаторами на ГПП для исследования режимов ВГС в электрических сетях поверхностного и подземного комплексов приведена на рис. 5.6 состоит из: двух источников электроэнергии; двух трехобмоточных трансформаторов; двух двухобмоточных трансформаторов; ПФ ВГС настроенных на подавление 5, 7, 11 и 13 высших гармоник; кабельных и воздушных линий; коммутационных аппаратов; блоков для измерения суммарных значений коэффициентов K_U и K_I ; осциллографов. В модели имеется подсистемы, которые имитируют режимы работы оборудования линейных и нелинейных технологических электропротребителей, а также участков угольной шахты: главная вентиляционная установка (ГВУ 1, ГВУ 2); шахтные подъемные установки (ШПУ 1, ШПУ 2); выемочный участок (ВУ); участок конвейерного транспорта (УКТ); проходческие участки (ПУ 1, ПУ 2); участок водоотлива (УВ).

Подсистема имитационной модели ЭТС выемочного участка угольной шахты приведена на рис. 5.7.

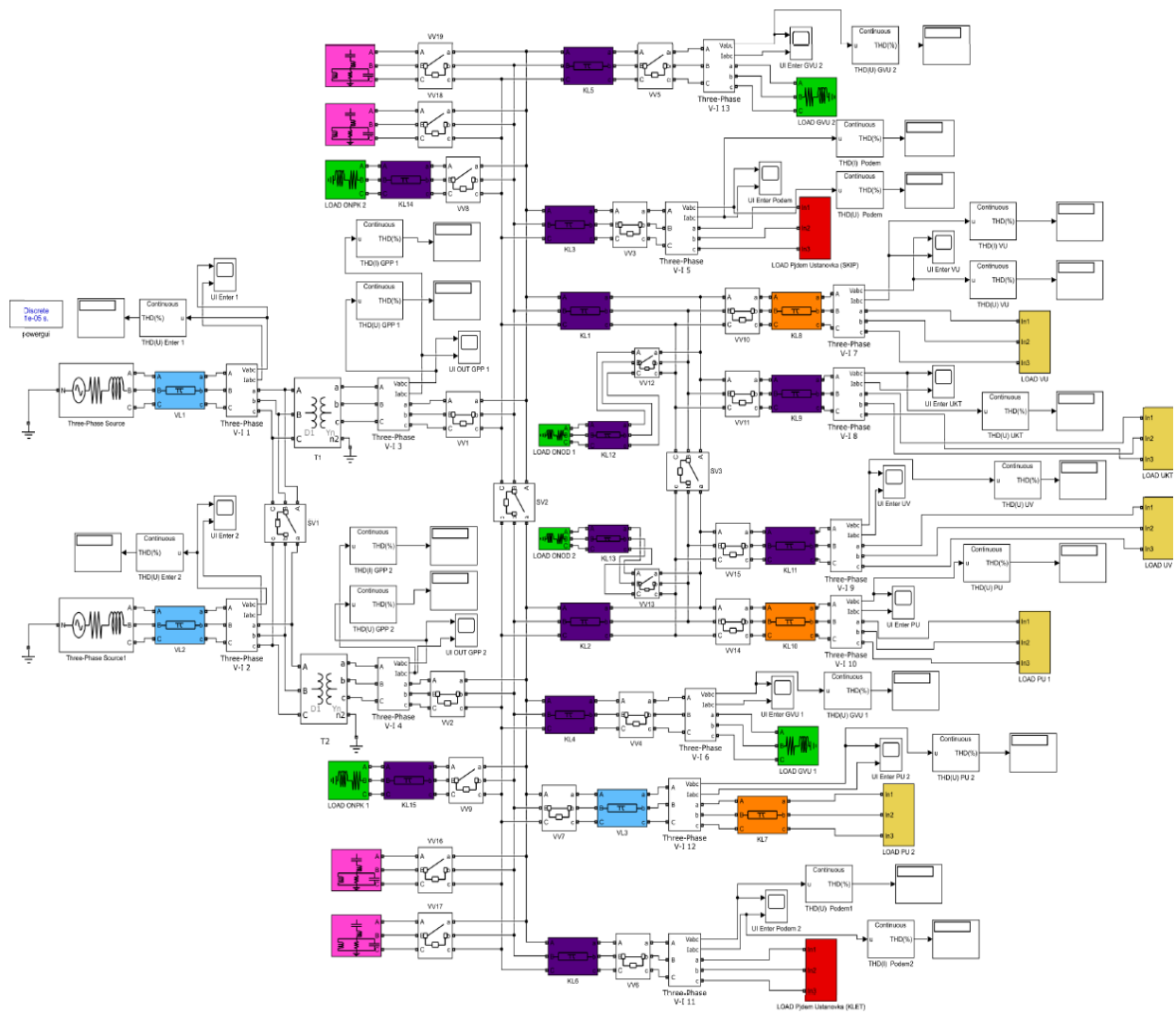


Рисунок 5.5 – Имитационная модель ЭТС угольной шахты с двухобмоточными трансформаторами на ГПП для исследования режимов ВГС в электрических сетях поверхностного и подземного комплексов

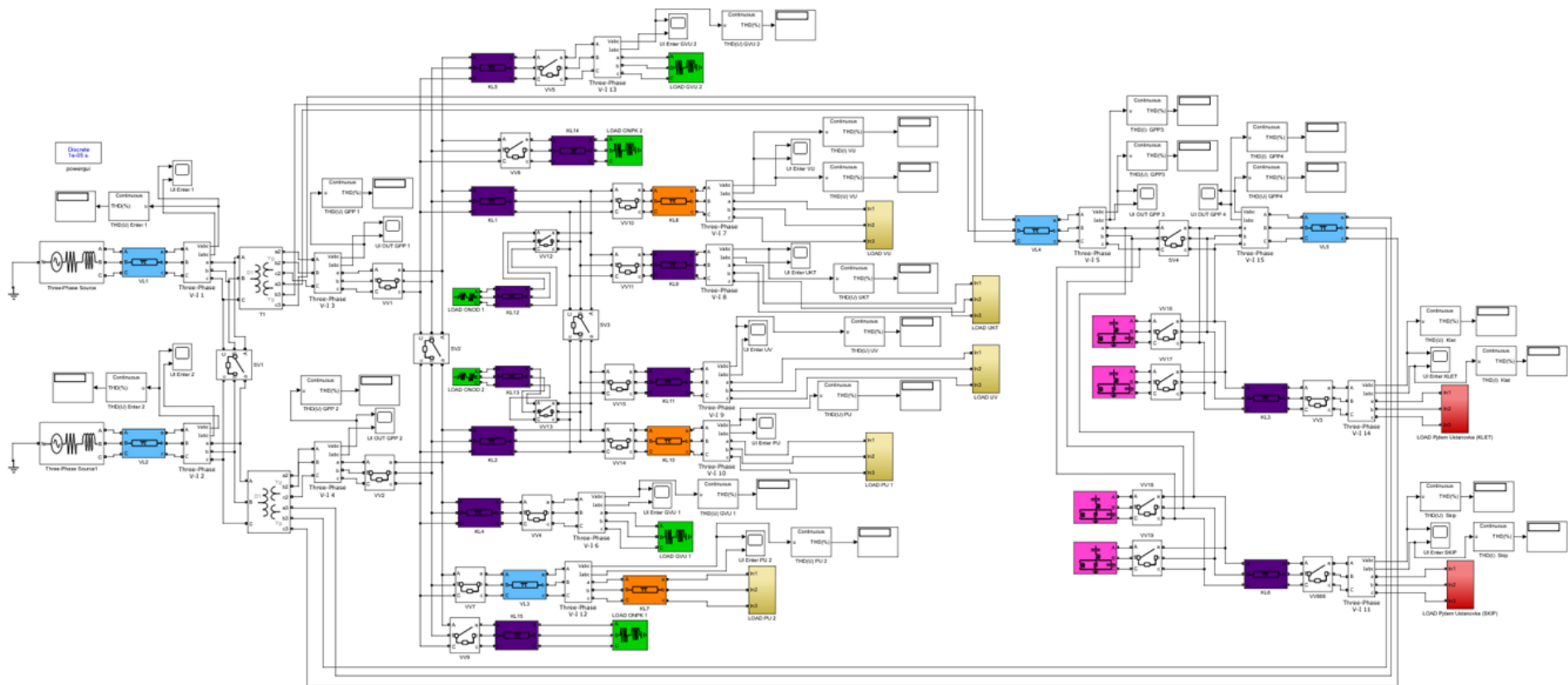


Рисунок 5.6 – Имитационная модель ЭТС угольной шахты с трехобмоточными трансформаторами на ГПП для исследования режимов ВГС в электрических сетях поверхностного и подземного комплексов

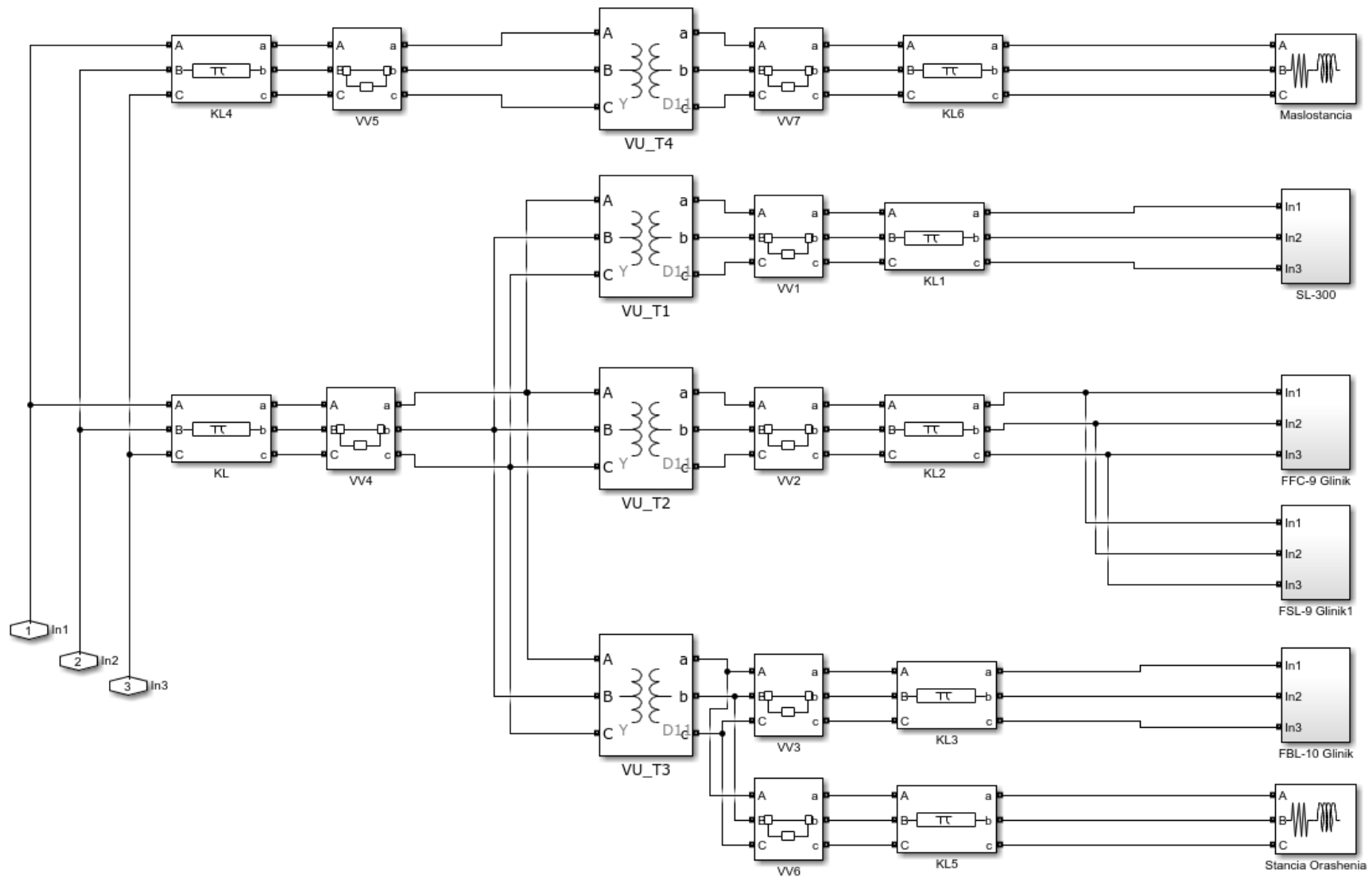


Рисунок 5.7 -Подсистема имитационной модели ЭТС выемочного участка угольной шахты

Подсистема состоит из: кабельных линий, коммутационных аппаратов, четырех понизительных подстанций, три из которых одна 6/3,3 кВ и две 6/1,14 кВ входят в состав энергопоезда, а одна 6/1,14 кВ в его состав энергопоезда не входит и служит для электропитания маслостанции механизированной крепи выемочного участка. В состав подсистемы входят модели линейных и нелинейных нагрузок электропотребителей технологического оборудования выемочного участка. Часть технологического оборудования включает в своем составе нелинейную нагрузку: - выемочный комбайн (*SL-300*), забойный конвейер (*FFC-9 Glinik*), перегружатель (*FSL-9 Glinik*), часть оборудования приведены линейной нагрузкой: дробилка (*FBL-9 Glinik*), станции орошения (*Stancia oroshenia*) и маслостанции (*Maslostancia*).

Подсистема имитационной модели ЭТС проходческого участка угольной шахты приведена на рис. 5.8. Подсистема состоит из: трех понизительных подстанций 6/1,14 кВ, кабельных линий, коммутационных аппаратов. В состав подсистемы входят модели линейных и нелинейных нагрузок электропотребителей технологического оборудования проходческого участка. В качестве нелинейной нагрузки является подсистема имитационной модели ЭТС проходческого комбайна JOY12CV12. В качестве линейной нагрузки являются: вентиляторы местного проветривания ВМП 2–10, осланцеватель на базе вентилятора ВМП-6, ленточные конвейеры 2ЛТ100, насос 1в29, перегружатель ленточный КПЛ-500.

Подсистемы модели ЭТС угольной шахты приведены на рис. 5.9.

Подсистема имитационной модели участка конвейерного транспорта угольной шахты приведена на рис. 5.9а. Подсистема включает: три понизительные подстанции 6/1,14 кВ, кабельные линии, коммутационные аппараты. Приводных двигатели ленточных конвейеров являются линейной нагрузкой.

Подсистема имитационной модели участка водоотведения угольной шахты приведена на рис. 5.9б.

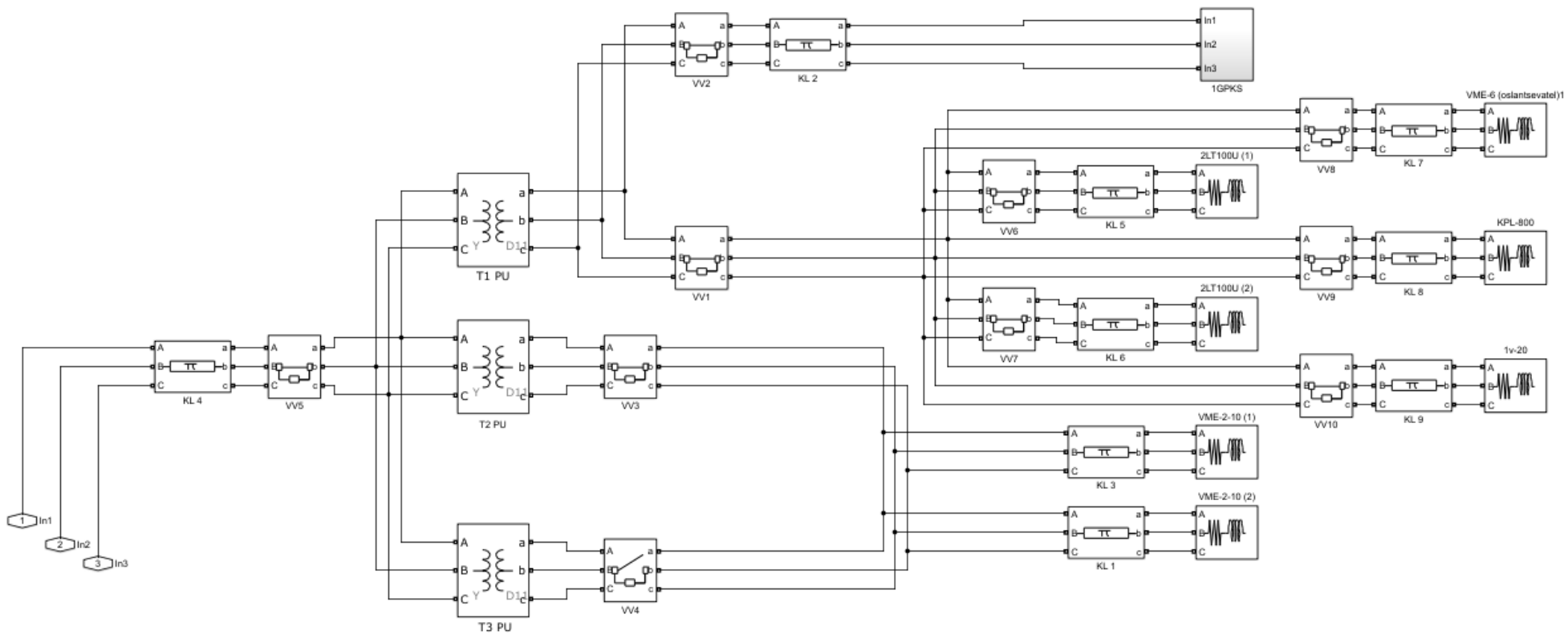


Рисунок 5.8 - Подсистема имитационной модели ЭТС проходческого участка угольной шахты

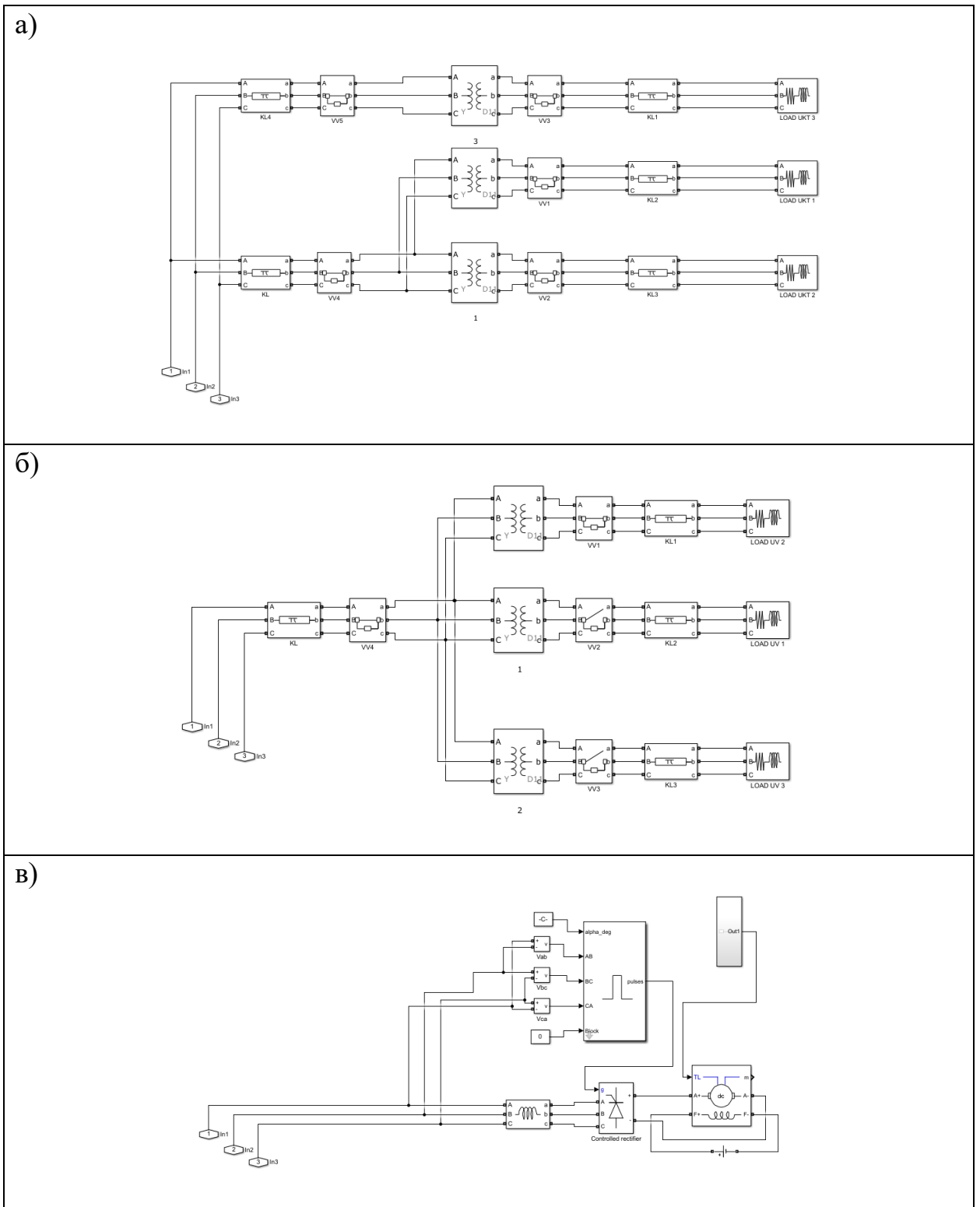


Рисунок 5.9 - Подсистемы модели ЭТС угольной шахты:

а) - участок конвейерного транспорта; б) - участок водоотлива;

в) - подъемная установка

Подсистема включает: три понизительные подстанции 6/1,14 кВ, кабельные линии, коммутационные аппараты. Приводных двигатели насосных установок являются линейная нагрузка.

Подсистема имитационной модели ШПУ угольной шахты приведена на рис. 5.9в, которая состоит из управляемого выпрямителя, генерирующего ВГС и нагрузки.

Разработанные имитационные модели позволяют исследовать режимы генерирования ВГС в ЭТС угольных шахт для обоснования параметров и применения ФКУ.

5.2 Исследование режимов генерирования высших гармонических составляющих в электротехнических системах поверхностного комплекса угольных шахт

5.2.1 Исследование режимов генерирования высших гармонических составляющих в электротехнических системах поверхностного комплекса угольных шахт с двухобмоточными трансформаторами на главной понизительной подстанции

Исследование режимов генерирования ВГС в ЭТС поверхностного комплекса угольных шахт с двухобмоточными трансформаторами на ГПП проведено в соответствии с Методикой имитационного моделирования режимов генерирования ВГС в ЭТС угольных шахт (п.3.3).

В результате имитационного моделирования ЭТС угольных шахт получены значения суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) для всех диапазонов мощности ШПУ и длины кабельных линий от ЦПП до выемочного участка. Имитационное моделирование проведено для следующих параметров: мощность ШПУ находится в диапазоне от 1000 до 6000 кВт; длина кабельной линии от ЦПП до выемочного участка находится в диапазоне от 1000 м до 5000 м.

Результаты имитационного моделирования приведены в табличном и графическом виде.

Значения коэффициентов суммарного значения гармонических составляющих напряжения ($K_{U_{шпу}}$) на вводе ШПУ в зависимости от мощности электропривода ШПУ ($P_{пу}$) и длины кабельной линии от ЦПП до выемочного участка ($L_{кл.ву.}$) приведены в табл. 5.2. Данные таблицы показывают повышение $K_{U_{шпу}}$ при увеличении мощности электропривода ШПУ для определенных значениях длины кабельной линии от ЦПП до выемочного участка.

Таблица 5.2 – Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения ($K_{U_{ШПУ}}$) на вводе ШПУ в зависимости от мощности ШПУ и длины кабельной линии от ЦПП до выемочного участка*)

Длина КЛ, м	Мощность ШПУ, кВт, ($U=6,6$ кВ)										
	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000
1000	6,83	8,97	10,12	11,48	12,72	13,90	15,06	15,94	16,89	17,75	18,62
1250	6,82	8,95	10,10	11,46	12,69	13,87	15,03	15,92	16,81	17,66	18,62
1500	6,82	8,93	10,09	11,47	12,70	13,85	14,99	15,91	16,81	17,62	18,62
1750	6,81	8,91	10,07	11,47	12,71	13,83	14,94	15,89	16,79	17,60	18,62
2000	6,80	8,90	10,06	11,45	12,71	13,84	14,91	15,84	16,76	17,58	18,61
2250	6,78	8,88	10,06	11,43	12,68	13,83	14,90	15,81	16,73	17,57	18,55
2500	6,77	8,87	10,06	11,39	12,67	13,83	14,87	15,81	16,69	17,56	18,49
2750	6,75	8,86	10,06	11,38	12,63	13,80	14,80	15,80	16,66	17,55	18,46
3000	6,74	8,85	10,06	11,38	12,60	13,76	14,79	15,79	16,65	17,52	18,44
3250	6,73	8,84	10,02	11,38	12,58	13,74	14,78	15,75	16,64	17,47	18,43
3500	6,71	8,83	10,00	11,36	12,61	13,72	14,77	15,73	16,62	17,43	18,42
3750	6,70	8,82	10,00	11,34	12,58	13,70	14,75	15,69	16,60	17,41	18,38
4000	6,68	8,81	10,00	11,33	12,57	13,71	14,72	15,66	16,54	17,40	18,31
4250	6,66	8,80	9,97	11,28	12,53	13,68	14,69	15,66	16,51	17,39	18,23
4500	6,65	8,79	9,97	11,27	12,50	13,65	14,68	15,65	16,50	17,34	18,22
4750	6,63	8,78	9,94	11,27	12,47	13,60	14,64	15,62	16,49	17,29	18,22
5000	6,63	8,77	9,90	11,26	12,45	13,56	14,61	15,59	16,47	17,25	18,17

*) Цветом выделены значения, превышающие требуемые ГОСТ 32144–2013 для уровня напряжения 6 кВ

В качестве примера на рис. 5.10 приведены: синусоида с искажениями, гармонический состав и суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения $K_{U_{шпу}}$ на вводе ШПУ.

На рис. 5.10 приведены данные для момента моделирования при мощности электропривода ШПУ, равной 4000 кВт, длине кабельной линии от ЦПП до выемочного участка 1000 м, при этом значение $K_{U_{шпу}}$ составило 15,06 %.

Геометрической интерпретацией зависимости $K_{U_{шпу}}$ от мощности электропривода ШПУ и длины кабельной линии от ЦПП до выемочного участка является поверхность в трехмерном пространстве, приведенная на рис. 5.11.

Для упрощения анализа режимов генерирования ВГС выполнена аппроксимация результатов моделирования с получением аналитических зависимостей проекций вышеуказанной поверхности на плоскости мощности электропривода ШПУ ($P_{шпу}$) и длины кабельной линии от ЦПП до выемочного участка ($L_{кл.ву}$).

Зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения, генерируемых преобразовательным устройством схемы управления электроприводом ШПУ ($K_{U_{шпу}}$), от мощности электропривода ШПУ ($P_{шпу}$) при фиксированной длине кабельной линии от ЦПП до выемочного участка ($L_{кл.ву}=3000$ м) (рис.5.12) описывается выражением:

$$K_{U_{шпу}} = 5,4373 + 0,0023 * P_{шпу}. \quad (5.1)$$

Анализ зависимости суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения, генерируемых преобразовательным устройством схемы управления электроприводом ШПУ ($K_{U_{шпу}}$), от мощности электропривода ШПУ ($P_{шпу}$) при длине кабельной линии от ЦПП до выемочного участка ($L_{кл.ву}=3000$ м) показал его изменения ($K_{U_{шпу}}$) в диапазоне от 6,74 % до 18,44 %.

Зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения, генерируемых преобразовательным устройством схемы управления электроприводом ШПУ ($K_{U_{шпу}}$), от длины кабельной линии от ЦПП до выемочного участка ($L_{кл.ву}$) при фиксированной мощности ШПУ ($P_{шпу}=3500$ кВт) (рис.5.13) описывается выражением:

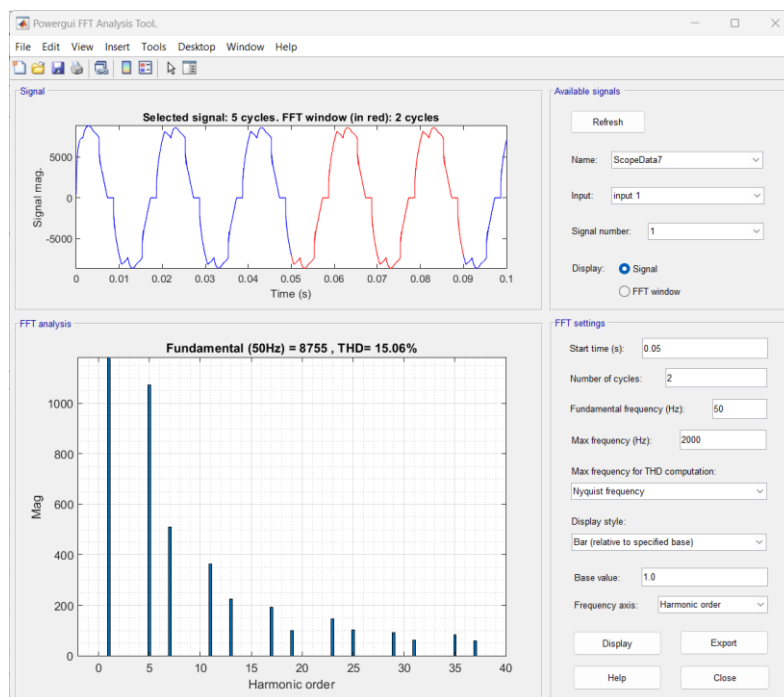


Рисунок 5.10 – Синусоида напряжения с искажениями, гармонический состав и суммарный коэффициент гармонических составляющих на вводе ШПУ ($P_{шпу}=4000$ кВт, $L_{в\у}=1000$ м)

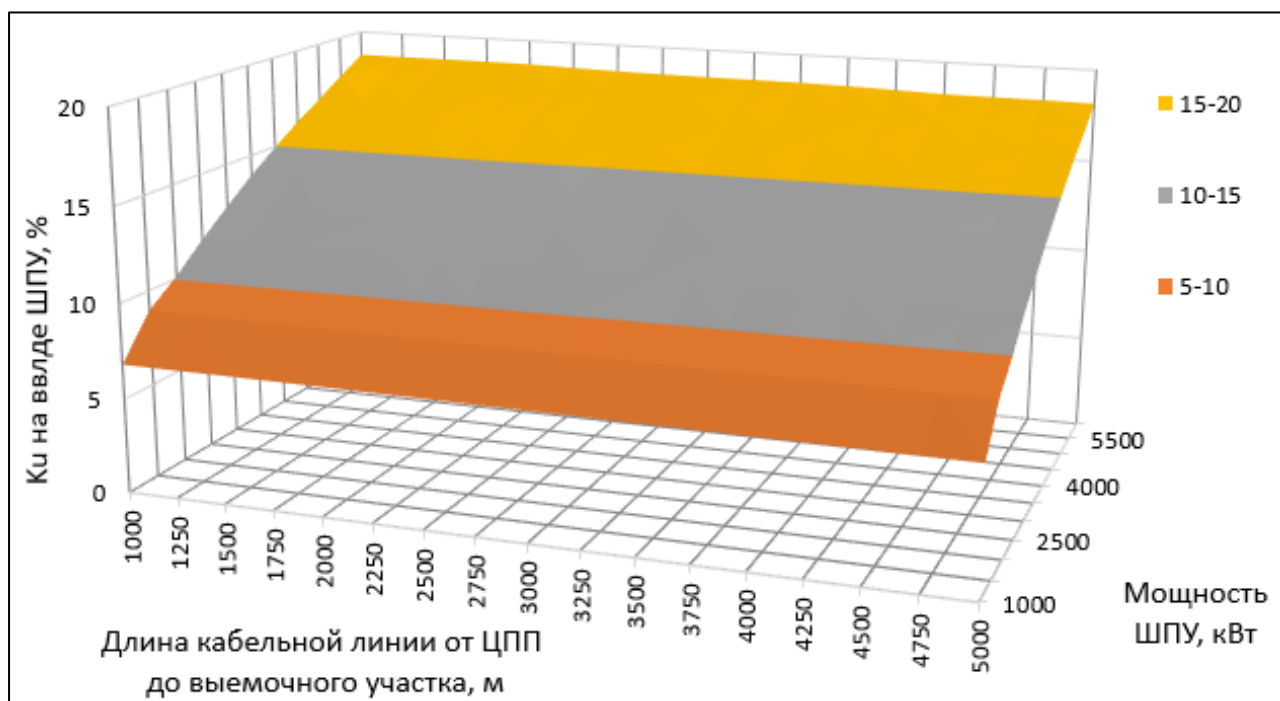


Рисунок 5.11 – Геометрическая интерпретация зависимости суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения на вводе ШПУ в зависимости от мощности электропривода ШПУ и длины кабельной линии от ЦПП до выемочного участка $K_{Uшпу}=f(P_{шпу}, L_{к\л.в\у})$

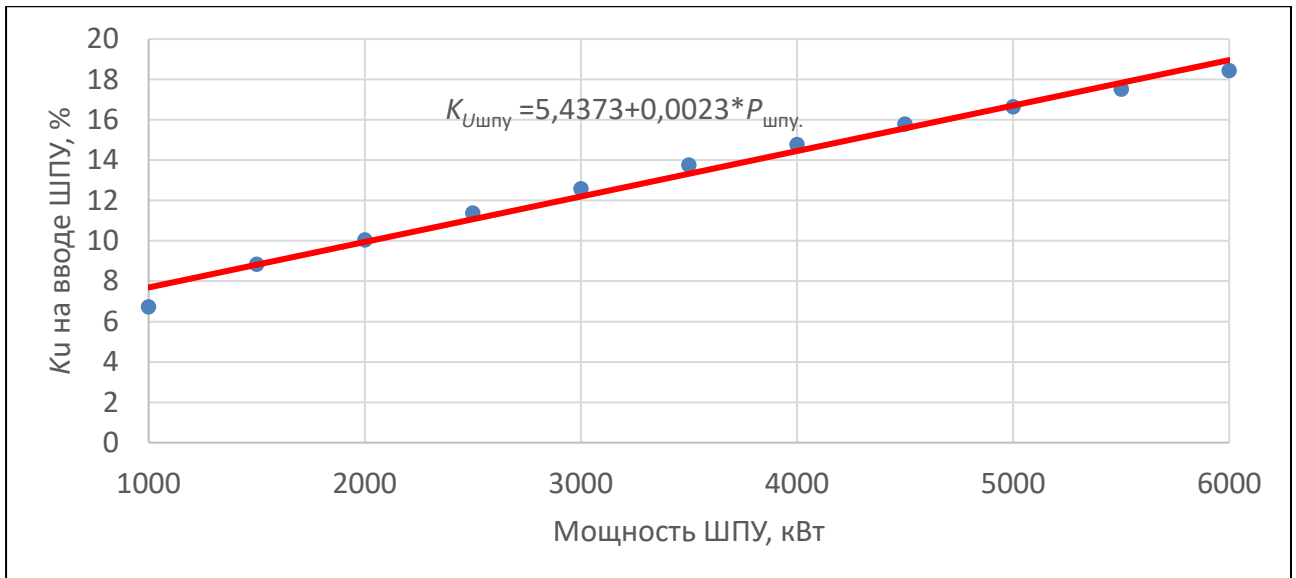


Рисунок 5.12 – Зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения на вводе ШПУ ($K_{U_{шпу}}$) от мощности ШПУ ($P_{шпу}$) при фиксированной длине кабельной линии от ЦПП до выемочного участка ($L_{кл.ву}=3000$ м)

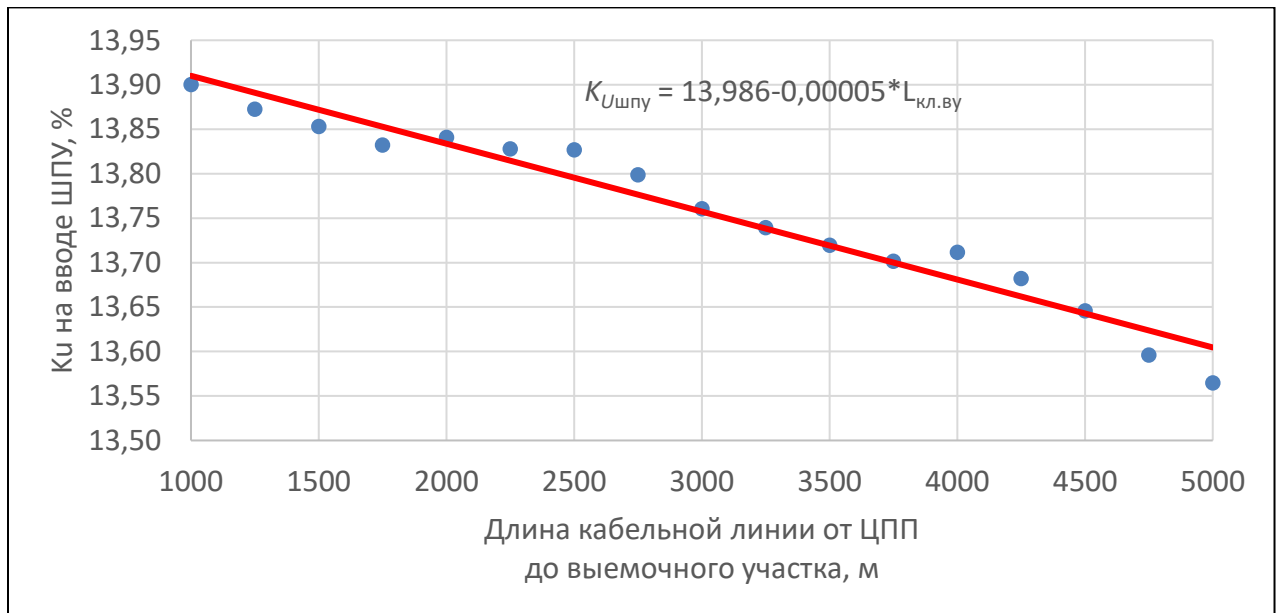


Рисунок 5.13 – Зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения на вводе ШПУ ($K_{U_{шпу}}$) от длины кабельной линии от ЦПП до выемочного участка ($L_{кл.ву}$) при фиксированной мощности ШПУ ($P_{шпу}=3500$ кВт)

$$K_{U_{шпу}} = 13,986 - 0,00005 * L_{кл.ву}. \quad (5.2)$$

Анализ зависимости суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения, генерируемым преобразовательным устройством ШПУ ($K_{U_{шпу}}$) от длины кабельной линии от ЦПП до выемочного участка ($L_{кл.ву}$) при мощности ШПУ ($P_{шпу}=3500$ кВт) показал его изменения ($K_{U_{шпу}}$) в диапазоне от 13,56 % до 13,90 %.

Данные табл. 5.2 показывают, что суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения ($K_{U_{шпу}}$) имеет значения в диапазоне от 6,63 % до 18,62 %, что превышает требуемое по ГОСТ 32144-2013 значение.

Значения коэффициентов суммарного значения гармонических составляющих напряжения ($K_{U_{гпп}}$) на шинах ГПП (6 кВ) в зависимости от мощности ШПУ и длины кабельной линии от ЦПП до выемочного участка приведены в табл. 5.3. Данные таблицы показывают повышение $K_{U_{гпп}}$ при увеличении мощности ШПУ для определенных значений длины кабельной линии от ЦПП до выемочного участка.

В качестве примера на рис. 5.14 приведены: синусоида с искажениями, гармонический состав и суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения $K_{U_{гпп}}$ на шинах ГПП.

На рис. 5.14 приведены данные для момента моделирования при мощности электропривода ШПУ, равной 2500 кВт, длине кабельной линии от ЦПП до выемочного участка 2000 м, при этом значение $K_{U_{шпу}}$ составило 16,89 %.

Геометрической интерпретацией зависимости $K_{U_{гпп}}$ на шинах ГПП 6 кВ от мощности приводов ШПУ и длины кабельной линии от ЦПП до выемочного участка является поверхность в трехмерном пространстве, приведенная на рис.5.15.

Для упрощения анализа режимов генерирования ВГС на шинах ГПП 6 кВ выполнена аппроксимация результатов моделирования с получением аналитических зависимостей проекций вышеуказанной поверхности на плоскости мощности электропривода ШПУ ($P_{шпу}$) и длины

Таблица 5.3 – Коэффициент суммарного значения гармонических составляющих напряжения ($K_{U_{ГПП}}$) на шинах ГПП 6 кВ в зависимости от мощности ШПУ и длины кабельной линии от ЦПП до выемочного участка*)

Длина КЛ, м	Мощность ШПУ, кВт, ($U=6,6$ кВ)										
	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000
1000	5,67	7,41	8,91	10,27	11,51	12,69	13,74	14,73	15,61	16,54	17,41
1250	5,66	7,38	8,89	10,25	11,48	12,66	13,73	14,71	15,60	16,45	17,41
1500	5,65	7,36	8,88	10,26	11,49	12,64	13,72	14,7	15,60	16,41	17,41
1750	5,66	7,35	8,86	10,26	11,50	12,62	13,71	14,68	15,58	16,39	17,41
2000	5,65	7,35	8,85	10,24	11,50	12,63	13,70	14,63	15,55	16,37	17,40
2250	5,65	7,35	8,85	10,22	11,47	12,62	13,69	14,60	15,52	16,36	17,34
2500	5,63	7,35	8,85	10,18	11,46	12,62	13,66	14,60	15,48	16,35	17,28
2750	5,61	7,33	8,85	10,17	11,42	12,59	13,59	14,59	15,45	16,34	17,25
3000	5,62	7,31	8,85	10,17	11,39	12,55	13,58	14,58	15,44	16,31	17,23
3250	5,63	7,31	8,81	10,17	11,37	12,53	13,57	14,54	15,43	16,26	17,22
3500	5,62	7,3	8,79	10,15	11,40	12,51	13,56	14,52	15,41	16,22	17,21
3750	5,61	7,28	8,79	10,13	11,37	12,49	13,54	14,48	15,39	16,20	17,17
4000	5,58	7,27	8,79	10,12	11,36	12,50	13,51	14,45	15,33	16,19	17,10
4250	5,57	7,26	8,76	10,07	11,32	12,47	13,48	14,45	15,30	16,18	17,02
4500	5,56	7,23	8,75	10,05	11,28	12,43	13,46	14,43	15,28	16,12	17,00
4750	5,56	7,22	8,72	10,05	11,25	12,38	13,42	14,40	15,27	16,07	17,00
5000	5,55	7,22	8,69	10,05	11,24	12,35	13,4	14,38	15,26	16,04	16,96

*) Цветом выделены значения, превышающие требуемые ГОСТ 32144–2013 для уровня напряжения 6 кВ

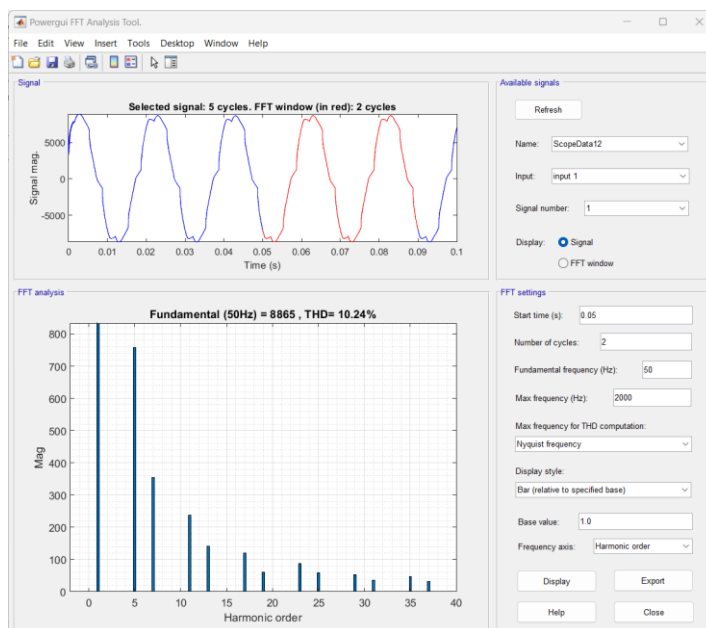


Рисунок 5.14 – Синусоида напряжения с искажениями, гармонический состав и суммарный коэффициент гармонических составляющих ($K_{U_{ГПП}}$) на шинах ГПП ($P_{ШПУ}=2500$ кВт, $L_{ВУ}=2000$ м)

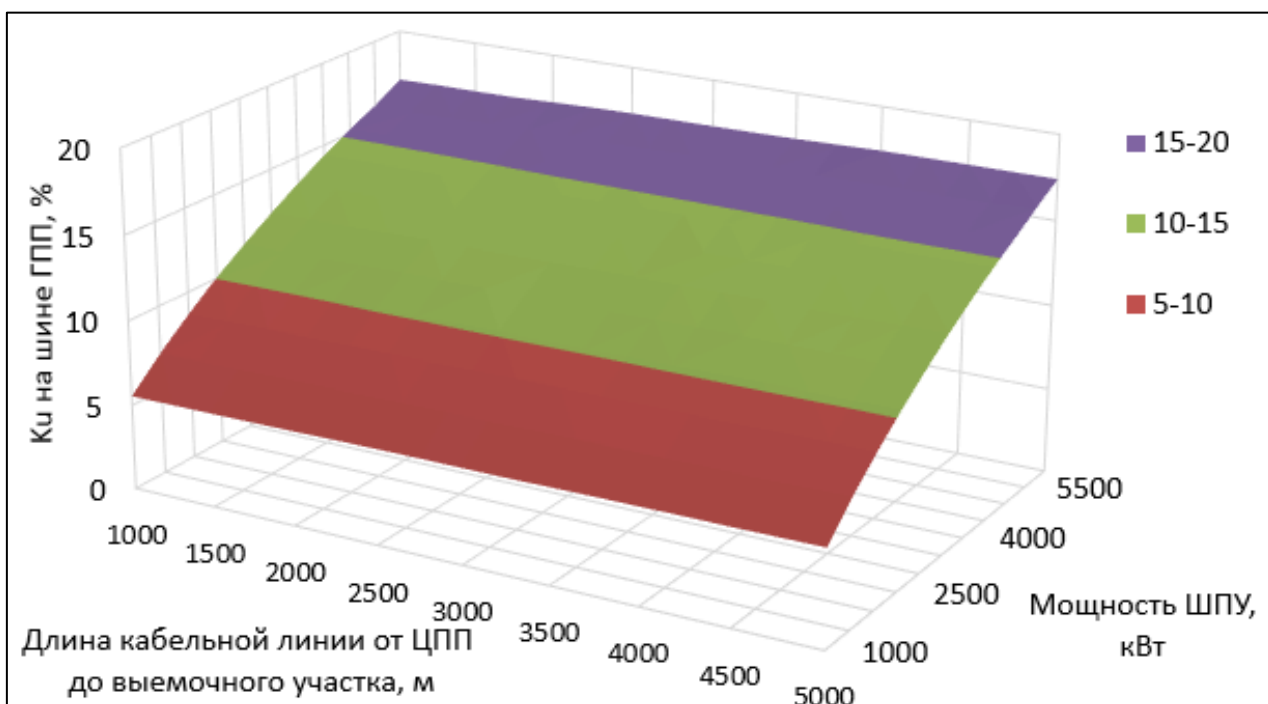


Рисунок 5.15 – Геометрическая интерпретация зависимости суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения ($K_{U_{ГПП}}$) на шинах ГПП от мощности ШПУ и длины кабельной линии от ЦПП до выемочного участка $K_{U_{ГПП}}=f(P_{ШПУ}, L_{КЛ.ВУ})$

кабельной линии от ЦПП до выемочного участка ($L_{\text{кл.ву.}}$).

Зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения, генерируемых на шинах ГПП 6 кВ преобразовательным устройством схемы управления электроприводом ШПУ ($K_{U_{\text{ГПП}}}$) от мощности электропривода ШПУ ($P_{\text{шпу.}}$) при фиксированной длине кабельной линии от ЦПП до выемочного участка ($L_{\text{кл.ву.}}=3000$ м) (рис.5.16) описывается выражением:

$$K_{U_{\text{ГПП}}}=4,15+0,0023*P_{\text{шпу}} \quad (5.3)$$

Анализ зависимости суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения, генерируемых на шинах ГПП 6 кВ преобразовательным устройством схемы управления электроприводом ШПУ ($K_{U_{\text{ГПП}}}$) от мощности электропривода ШПУ ($P_{\text{шпу.}}$) при длине кабельной линии от ЦПП до выемочного участка ($L_{\text{кл.ву.}}=3000$ м) показал его изменения ($K_{U_{\text{ГПП}}}$) в диапазоне от 5,62 % до 17,23 %.

Зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения, генерируемых на шинах ГПП 6 кВ преобразовательным устройством схемы управления электроприводом ШПУ ($K_{U_{\text{ГПП}}}$) от длины кабельной линии от ЦПП до выемочного участка ($L_{\text{кл.ву.}}$) при фиксированной мощности ШПУ ($P_{\text{шпу}}=3500$ кВт) (рис.5.17) описывается выражением:

$$K_{U_{\text{ГПП}}}=5,71-0,00003*L_{\text{кл.ву.}} \quad (5.4)$$

Анализ зависимости суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения ($K_{U_{\text{ГПП}}}$) на шинах ГПП 6 кВ от длины кабельной линии от ЦПП до выемочного участка ($L_{\text{кл.ву.}}$) при мощности ШПУ ($P_{\text{шпу}}=3500$ кВт) показал его изменения ($K_{U_{\text{ГПП}}}$) в диапазоне от 5,55 до 5,67%.

Данные табл. 5.3 показывают, что суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения ($K_{U_{\text{ГПП}}}$) имеет значения в диапазоне от 5,55 % до 17,41 %, что превышает требуемое по ГОСТ 32144-2013, значение равное 5 %.

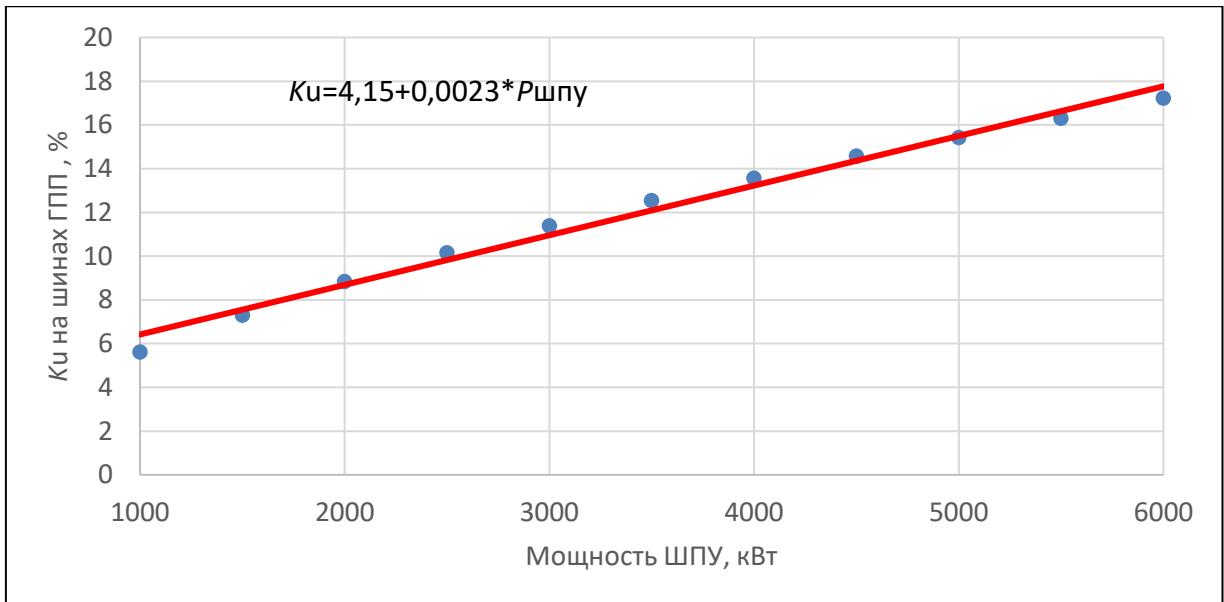


Рисунок 5.16 – Зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения ($K_{УГПП}$) на шинах ГПП 6 кВ от мощности ШПУ ($P_{шпу}$) при фиксированной длине кабельной линии от ЦПП до выемочного участка ($L_{кл.ву}=3000$ м)

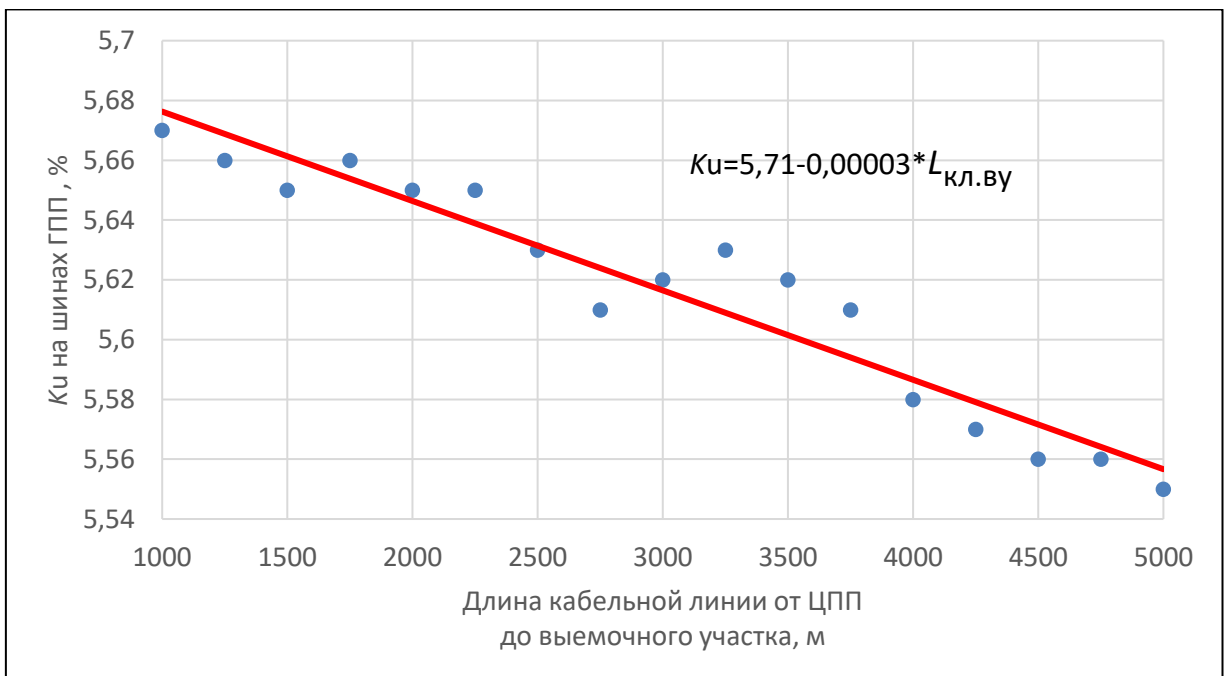


Рисунок 5.17 – Зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения ($K_{УГПП}$) на шинах ГПП 6 кВ от длины кабельной линии от ЦПП до выемочного участка ($L_{кл.ву}$) при фиксированной мощности ШПУ ($P_{шпу}=1000$ кВт)

Значения коэффициента суммарного значения гармонических составляющих напряжения ($K_{U_{\text{вы}}}$) на вводной ячейке КРУВ выемочного участка в зависимости от мощности ШПУ и длины кабельной линии от ЦПП до выемочного участка приведены в табл. 5.4.

Данные таблицы показывают увеличение $K_{U_{\text{вы}}}$ при увеличении мощности ШПУ при определенных значениях длины кабельной линии от ЦПП до выемочного участка.

В качестве примера на рис. 5.18 приведены гармонический состав и суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения $K_{U_{\text{шпу}}}$ на вводной ячейке КРУВ выемочного участка.

На рис. 5.18 приведены данные для момента моделирования при мощности электропривода ШПУ, равной 4000 кВт, длине кабельной линии от ЦПП до выемочного участка 1500 м, при этом значение $K_{U_{\text{шпу}}}$ составило 12,74%.

Геометрической интерпретацией зависимости $K_{U_{\text{вы}}}$ на вводной ячейке КРУВ выемочного участка от мощности приводов ШПУ и длины кабельной линии от ЦПП до выемочного участка является поверхность в трехмерном пространстве, приведенная на рис. 5.19.

Для упрощения анализа режимов генерирования ВГС выполнена аппроксимация результатов моделирования с получением аналитических зависимостей проекций вышеуказанной поверхности на плоскости мощности электропривода ШПУ ($P_{\text{шпу}}$) и длины кабельной линии от ЦПП до выемочного участка ($L_{\text{кл.вы}}$).

Зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения, генерируемых преобразовательным устройством схемы управления электроприводом ШПУ ($K_{U_{\text{вы}}}$) на вводной ячейке КРУВ выемочного участка, от мощности электропривода ШПУ ($P_{\text{шпу}}$) при длине кабельной линии от ЦПП до выемочного участка ($L_{\text{кл.вы}}=1750$ м) (рис.5.20) описывается выражением:

$$K_{U_{\text{вы}}}=4,4+0,00197*P_{\text{шпу}}. \quad (5.5)$$

Таблица 5.4 – Коэффициент суммарного значения гармонических составляющих напряжения (K_U) на вводной ячейке КРУВ выемочного участка в зависимости от мощности ШПУ и длины кабельной линии от ЦПП до выемочного участка*)

Длина КЛ, м	Мощность ШПУ, кВт, ($U=6,6$ кВ)										
	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000
1000	5,97	7,4	8,66	9,83	10,89	11,84	12,77	13,74	14,48	15,01	16,07
1250	5,93	7,34	8,62	9,78	10,81	11,8	12,74	13,63	14,41	14,96	16,02
1500	5,89	7,3	8,59	9,78	10,82	11,77	12,74	13,62	14,35	14,95	15,94
1750	5,88	7,26	8,55	9,77	10,85	11,76	12,73	13,56	14,3	14,94	15,94
2000	5,84	7,26	8,54	9,75	10,84	11,8	12,72	13,54	14,29	14,94	15,93
2250	5,81	7,24	8,53	9,72	10,8	11,8	12,71	13,51	14,27	14,89	15,93
2500	5,74	7,22	8,52	9,66	10,78	11,81	12,71	13,51	14,26	14,88	15,91
2750	5,7	7,18	8,5	9,64	10,73	11,77	12,69	13,51	14,25	14,85	15,9
3000	5,68	7,14	8,45	9,64	10,7	11,72	12,69	13,5	14,25	14,84	15,89
3250	5,68	7,12	8,42	9,65	10,75	11,72	12,69	13,5	14,25	14,82	15,88
3500	5,64	7,1	8,43	9,64	10,77	11,73	12,68	13,49	14,23	14,82	15,88
3750	5,61	7,08	8,44	9,63	10,76	11,74	12,68	13,49	14,22	14,8	15,88
4000	5,56	7,07	8,4	9,63	10,74	11,8	12,68	13,48	14,21	14,78	15,86
4250	5,53	7,06	8,41	9,61	10,75	11,8	12,67	13,47	14,21	14,78	15,84
4500	5,52	7,03	8,4	9,61	10,75	11,79	12,64	13,46	14,19	14,74	15,83
4750	5,51	7,02	8,41	9,64	10,75	11,79	12,61	13,46	14,18	14,73	15,82
5000	5,49	7,03	8,4	9,68	10,79	11,8	12,61	13,44	14,18	14,68	15,77

*) Цветом выделены значения, превышающие требуемые ГОСТ 32144–2013 для уровня напряжения 6 кВ

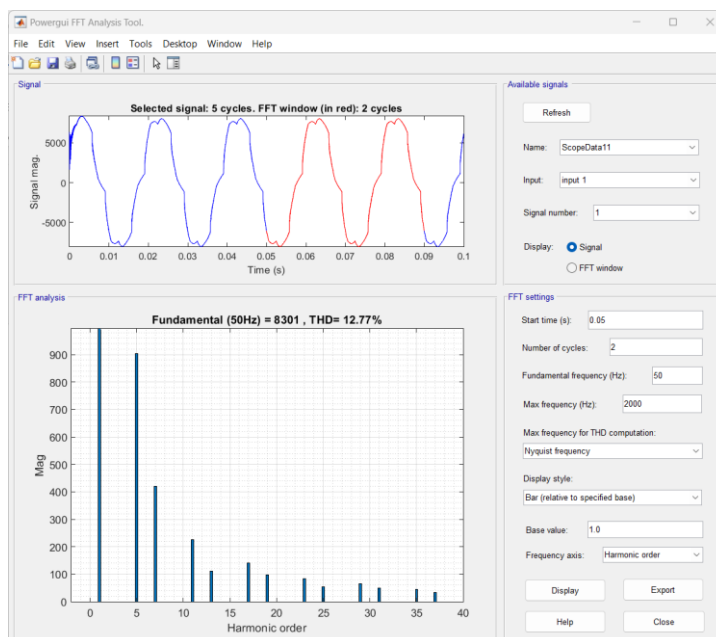


Рисунок 5.18 – Синусоида напряжения с искажениями, гармонический состав и суммарный коэффициент гармонических составляющих ($K_{U_{\text{ВУ}}}$) на вводной ячейке КРУВ выемочного участка ($P_{\text{ШПУ}}=4000$ кВт, $L_{\text{ВУ}}=1000$ м)

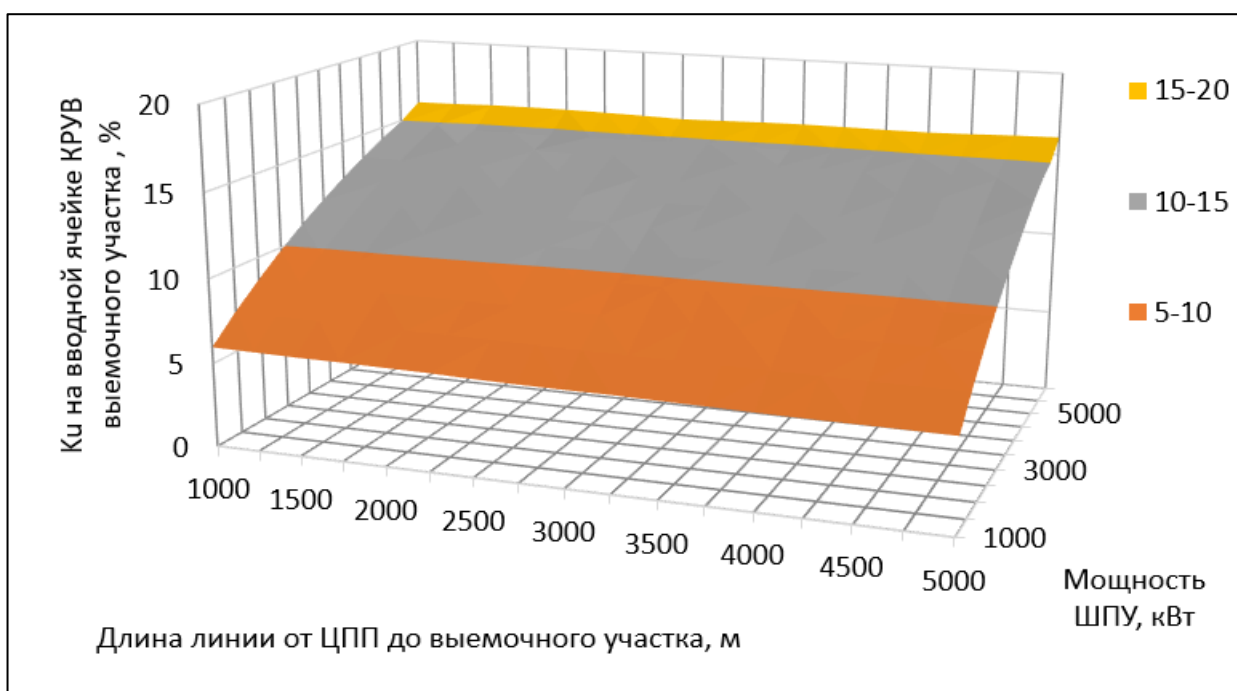


Рисунок 5.19 – Геометрическая интерпретация зависимости суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) на вводной ячейке КРУВ выемочного участка в зависимости от мощности ШПУ и длины кабельной линии от ЦПП до выемочного участка

$$K_{U_{\text{ВУ}}} = f(P_{\text{ШПУ}}, L_{\text{КЛ.ВУ}})$$

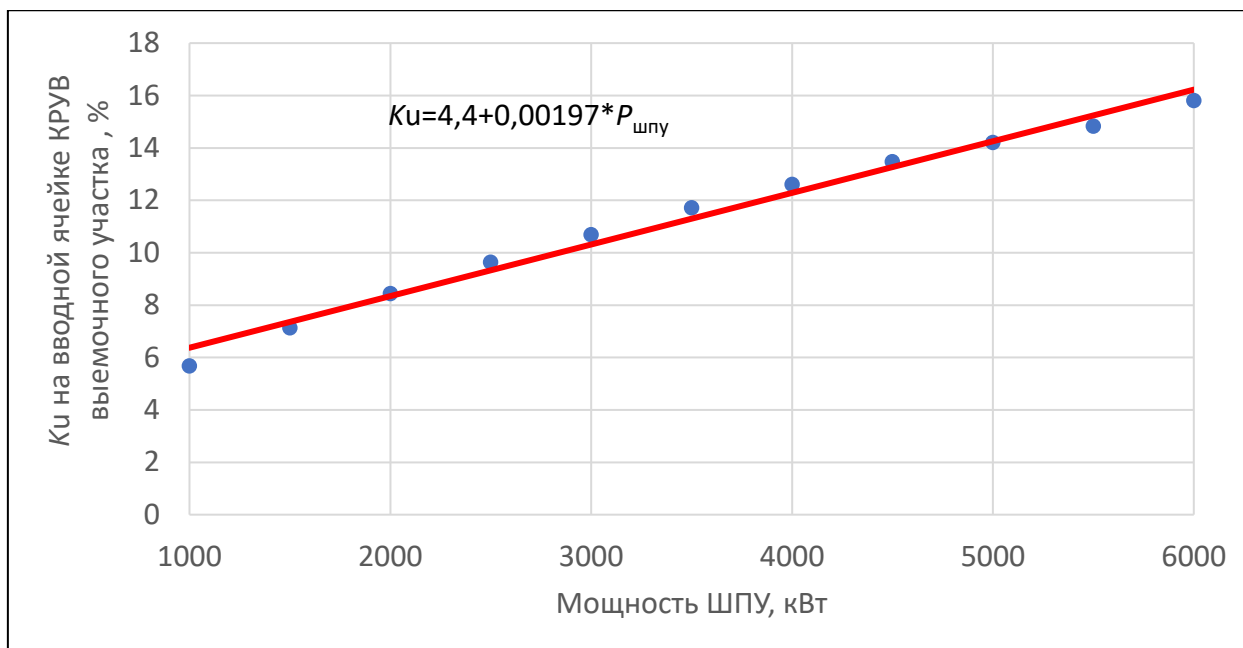


Рисунок 5.20 – Зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения ($K_{U_{в\у}}$) на вводной ячейке КРУВ выемочного участка в зависимости от мощности ШПУ при длине кабельной линии от ЦПП до выемочного участка ($L_{кл.в\у}=1750$ м)

Анализ зависимости суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения, генерируемых на шинах ГПП 6 кВ преобразовательным устройством схемы управления электроприводом ШПУ ($K_{U_{в\у}}$) на вводной ячейке КРУВ выемочного участка от мощности электропривода ШПУ ($P_{шпу.}$) при длине кабельной линии от ЦПП до выемочного участка ($L_{кл.в\у.}=1750$ м) показал его изменения ($K_{U_{гпп}}$) в диапазоне от 5,88 % до 15,94 %.

Зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения, генерируемых преобразовательным устройством схемы управления электроприводом ШПУ ($K_{U_{в\у}}$) на вводной ячейке КРУВ выемочного участка от длины кабельной линии от ЦПП до выемочного участка ($L_{кл.в\у}$) при мощности ШПУ ($P_{шпу}=2000$ кВт) (рис.5.21) описывается выражением:

$$K_{U_{в\у}}=9,9431*L_{кл.в\у}^{-0,02} \quad (5.6)$$

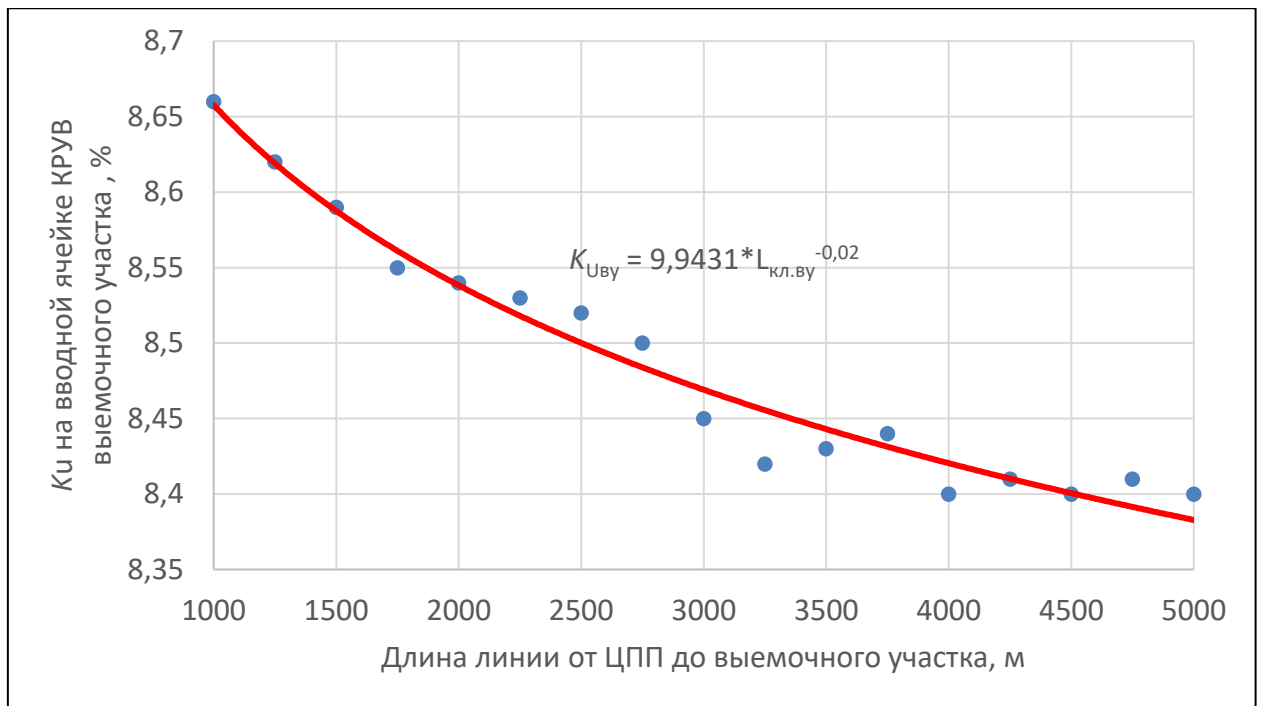


Рисунок 5.21 – Зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения ($K_{U_{vy}}$) на вводной ячейке КРУВ выемочного участка в зависимости от длины кабельной линии от ЦПП до выемочного участка ($L_{кл.ву}$) при мощности ШПУ ($P_{шпу}=2000$ кВт)

Анализ зависимости суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения ($K_{U_{vy}}$) от длины кабельной линии от ЦПП до выемочного участка ($L_{кл.ву}$) при фиксированной мощности ШПУ ($P_{шпу}$) на шинах ГПП 6 кВ показал его изменения ($K_{U_{гпп}}$) в диапазоне от 8,4 до 8,66 %.

Данные табл. 5.4 показывают, что суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения ($K_{U_{vy}}$) имеет значения в диапазоне от 5,49 % до 16,07 %, что превышает требуемое по ГОСТ 32144–2013, равное 5 %.

Сравнение значений, полученных при моделировании режимов генерирования ВГС в ЭТС угольных шахт при применении двухобмоточных трансформаторов на ГПП, со значениями, полученными в ходе экспериментального исследования, приведенных в Главе 2 (табл. 2.1), представлены в табл. 5.5.

Таблица 5.5 - Оценка сходимости результатов имитационного моделирования с экспериментальными исследованиями ПКЭ в ЭТС угольных шахт

Точка контроля	Параметры ЭТС		$K_U, \%$		Сходимость
	Мощность подъемной установки, кВт	Длина кабельной линии от ЦПП до выемочного участка	Экспериментальное исследование	Имитационное моделирование	
ПС-20 «ш. им. С.М. Кирова» (2 секция 6 кВ)	2500	2000	9,6	10,24	0,94

Данные табл. 5.5 показывают достаточно хорошую сходимость результатов экспериментальных исследований и имитационного моделирования на уровне 0,94, что характеризует высокую адекватность разработанных моделей ЭТС угольной шахты.

В результате имитационного моделирования режимов генерирования ВГС в ЭТС поверхностного комплекса угольных шахт с двухобмоточными трансформаторами на ГПП определены значения суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) и отклонения напряжения ($|\delta U|$) в зависимости от значений относительной мощности нелинейной нагрузки к линейной (δP), приведенные в табл. 5.6.

Зависимость суммарного коэффициент гармонических составляющих напряжения (K_U) от относительной (нелинейной к линейной) мощности нагрузки (δP) приведена на рис. 5.22 и соответствует выражению:

$$K_U = 2,0908 + 26,898 * \delta P. \quad (5.7)$$

Таблица 5.6 - Коэффициент суммарного значения гармонических составляющих напряжения (K_U) и отклонение напряжения ($|\delta U|$) в зависимости от значений относительной мощности нелинейной нагрузки (δP)

$P_{\text{нелинейная}}, \text{кВт}$	$P_{\text{линейная}}, \text{кВт}$	$\delta P, \text{о.е.}$	$K_U, \%$	$ \delta U , \%$
1200	12000	0,1	4,19	0,77
2400	12000	0,2	7,35	4,72
3600	12000	0,3	10,45	6,66
4800	12000	0,4	13,33	8,61
6000	12000	0,5	16,04	10,88
7200	12000	0,6	18,62	12,53
8400	12000	0,7	21,07	13,35
9600	12000	0,8	23,41	13,98
10800	12000	0,9	25,63	14,21

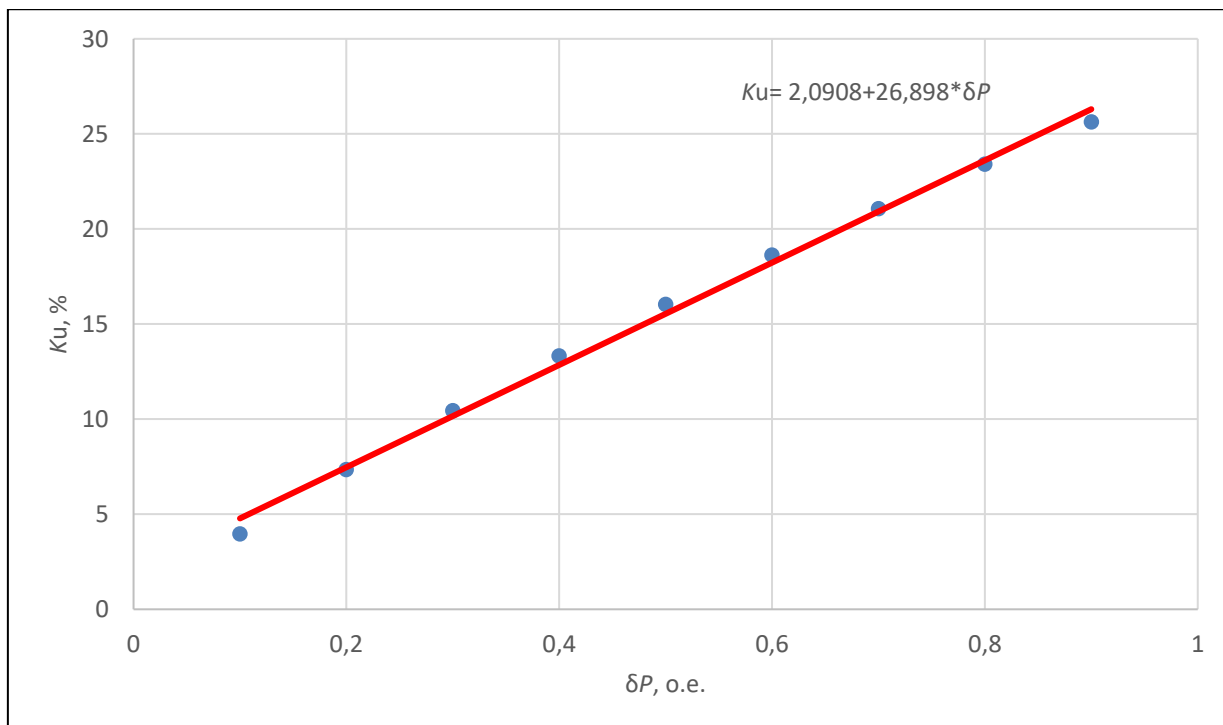


Рисунок 5.22 – Зависимость суммарного коэффициент гармонических составляющих напряжения (K_U) при относительных значениях мощности нелинейной нагрузки (δP) $K_U=f(\delta P)$

Зависимость отклонения напряжения по модулю ($|\delta U|$) от относительной (нелинейной к линейной) мощности нагрузки (δP) приведена на рис. 5.23 и соответствует выражению:

$$|\delta U| = 6,4853 \ln^*(\delta P) + 15,231. \quad (5.8)$$

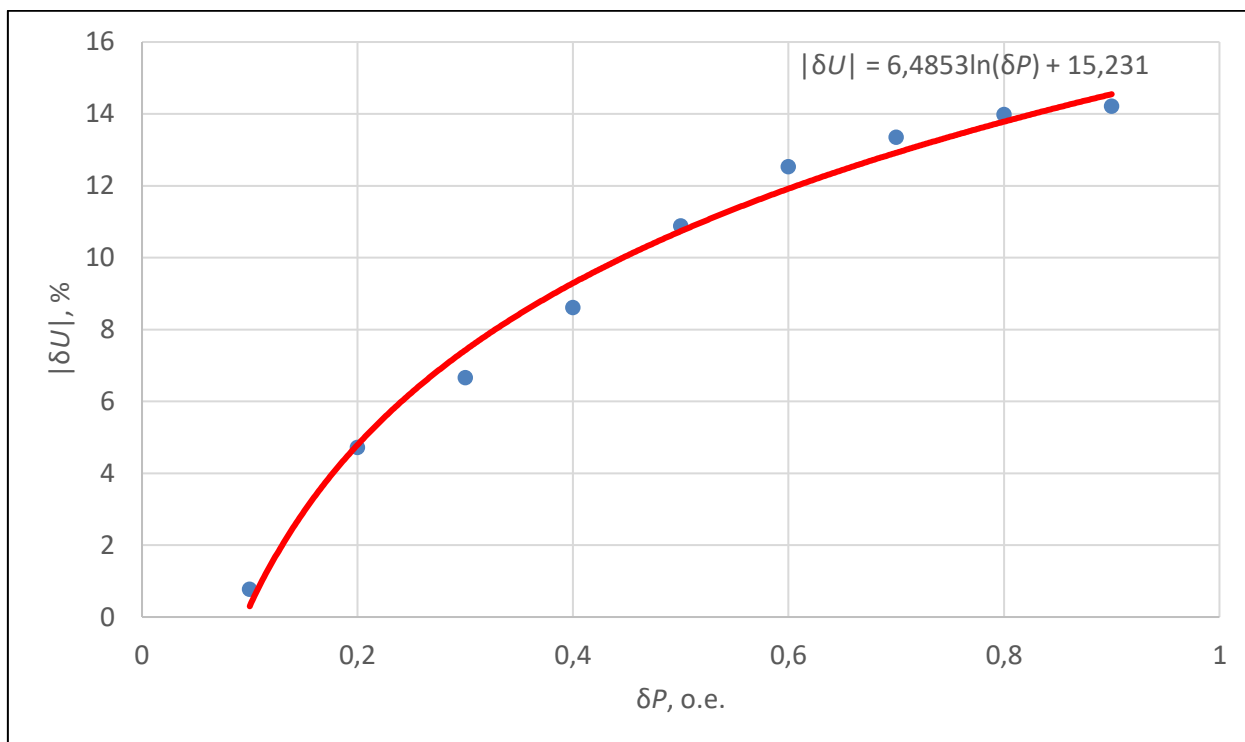


Рисунок 5.23 – Зависимость отклонения напряжения по модулю ($|\delta U|$) при относительных значениях мощности нелинейной нагрузки (δP) $|\delta U| = f(\delta P)$

Проведенные исследования показывают, хорошую сходимость результатов экспериментальных исследований и имитационного моделирования на уровне 0,94 при моделировании ЭТС угольной шахты. Установленные в ходе проведенного исследования зависимости идентично отражают режимы генерирования ВГС, имеют устойчивый фундаментальных характер и являются закономерностями, влияющими на ПКЭ.

5.2.2 Исследование режимов генерирования высших гармонических составляющих в электротехнических системах поверхностного комплекса угольных шахт с трехобмоточными трансформаторами на главной понизительной подстанции

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

Результаты имитационного моделирования приведены в табличном и графическом виде. Значения коэффициентов суммарного значения гармонических составляющих напряжения (K_U) на вводе ШПУ в зависимости от мощности ШПУ и длины линии от ГПП до ШПУ приведены в табл. 5.7. Данные таблицы показывают увеличение K_U при увеличении мощности ШПУ при определенных значениях длины линии от ГПП до ШПУ.

В качестве примера на рис. 5.24 приведены гармонический состав и суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения $K_{U_{шпу}}$ на вводе ШПУ. Значение $K_{U_{шпу}}$ при мощности электропривода ШПУ 3500 кВт и длины линии от ГПП до ШПУ 500 м равно 13,84 %.

Геометрической интерпретацией зависимости $K_{U_{шпу}}$ от мощности приводов ШПУ и длины линии от ГПП до ШПУ на вводе ШПУ является поверхность в трехмерном пространстве, приведенная на рис. 5.25.

Для упрощения анализа режимов генерирования ВГС выполнена аппроксимация результатов моделирования с получением аналитических зависимостей проекций вышеуказанной поверхности на плоскости мощности электропривода ШПУ ($P_{шпу.}$) и длины линии от ГПП до ШПУ ($L_{л.}$).

Таблица 5.7 – Коэффициент суммарного значения гармонических составляющих напряжения (K_U) на вводе ШПУ в зависимости от мощности ШПУ и длины линии от ГПП до ШПУ*)

Длина линии, м	Мощность ШПУ, кВт, ($U=6,6$ кВ)										
	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000
100	7,03	9,23	10,42	11,82	13,09	14,01	15,39	16,41	17,38	18,27	18,70
200	7,01	9,21	10,39	11,78	13,06	13,97	15,34	16,36	17,34	18,22	18,65
300	6,98	9,17	10,34	11,73	13,00	13,93	15,28	16,29	17,26	18,14	18,57
400	6,94	9,11	10,28	11,66	12,92	13,88	15,19	16,20	17,16	18,04	18,46
500	6,92	9,09	10,25	11,63	12,89	13,84	15,15	16,15	17,11	17,98	18,41
600	6,91	9,08	10,24	11,61	12,87	13,80	15,13	16,13	17,09	17,96	18,38
700	6,89	9,05	10,21	11,58	12,83	13,74	15,08	16,08	17,04	17,91	18,33
800	6,86	9,01	10,16	11,53	12,78	13,70	15,02	16,01	16,96	17,83	18,25
900	6,84	8,98	10,13	11,50	12,74	13,66	14,97	15,96	16,91	17,78	18,20
1000	6,82	8,96	10,12	11,47	12,73	13,70	14,95	15,95	16,88	17,74	18,16

*)Цветом выделены значения, превышающие требуемые ГОСТ 32144–2013 для уровня напряжения 6 кВ

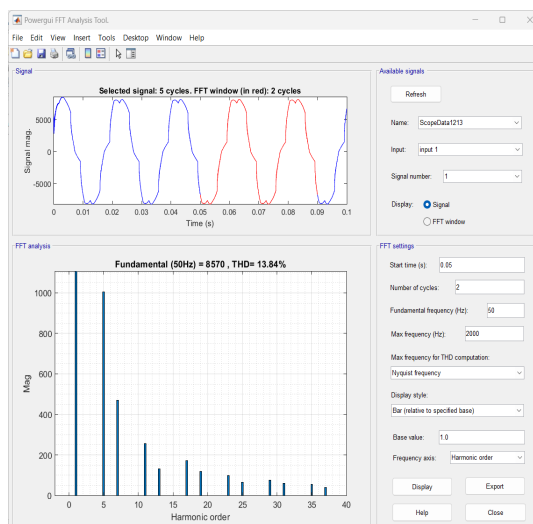


Рисунок 5.24 - Синусоида напряжения с искажениями, гармонический состав и суммарный коэффициент гармонических составляющих (K_U) на вводе ШПУ ($P_{шпу}=3500$ кВт, $L_{бу}=500$ м)

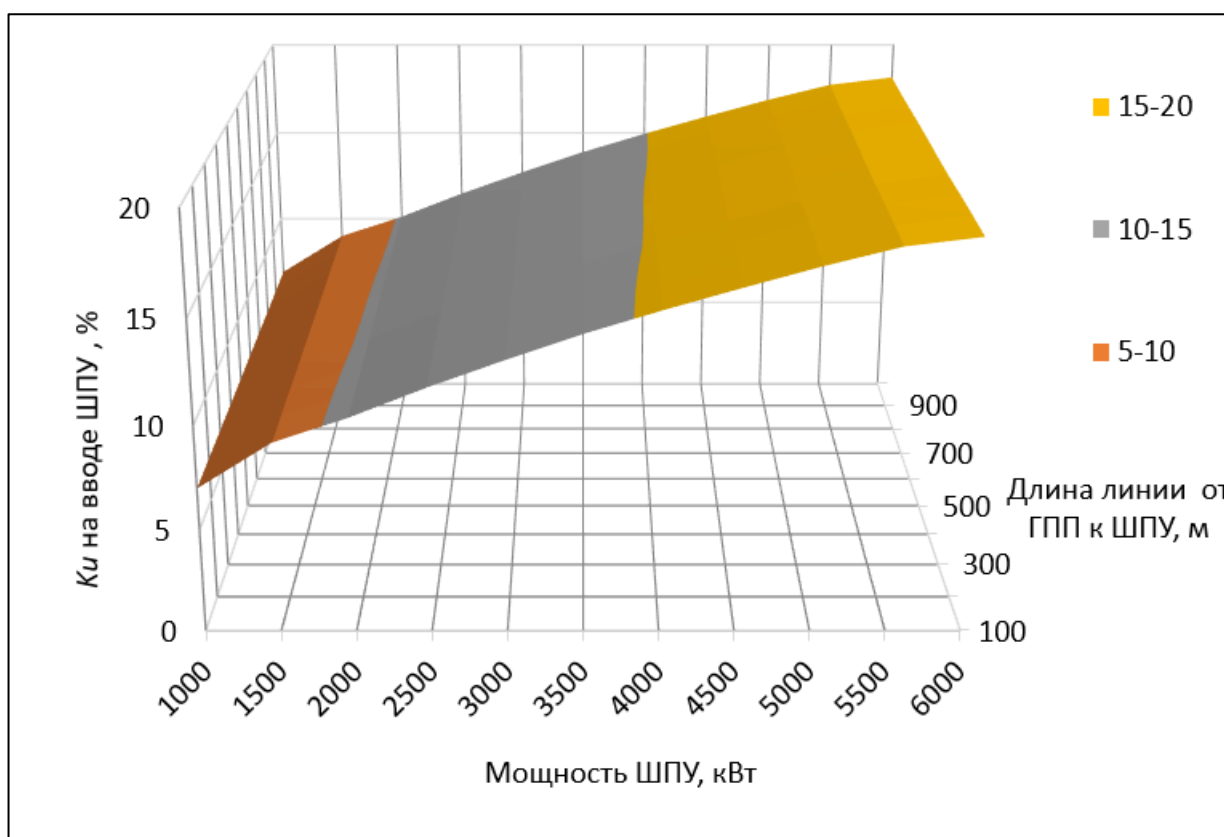


Рисунок 5.25 – Геометрическая интерпретация зависимости суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) на вводе ШПУ от мощности ШПУ и длины линии от ГПП с трехобмоточными трансформаторами до ШПУ $K_U = f(P_{шпу}, L_{л.})$

Зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения, генерируемых преобразовательным устройством электроприводом ШПУ ($K_{U_{шпу}}$) от мощности электропривода ШПУ ($P_{шпу}$) при длине линии от ГПП до ШПУ ($L_{л}=100$ м) (рис.5.26) описывается выражением:

$$K_U = 5,7475 + 0,0023 * P_{шпу} \quad (5.9)$$

Анализ зависимости суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения, генерируемых преобразовательным устройством электроприводом ШПУ ($K_{U_{шпу}}$) от мощности электропривода ШПУ ($P_{шпу}$) при длине линии от ГПП до ШПУ ($L_{л}=100$ м) показал его изменения ($K_{U_{шпу}}$) в диапазоне от 7,03 % до 18,70 %.

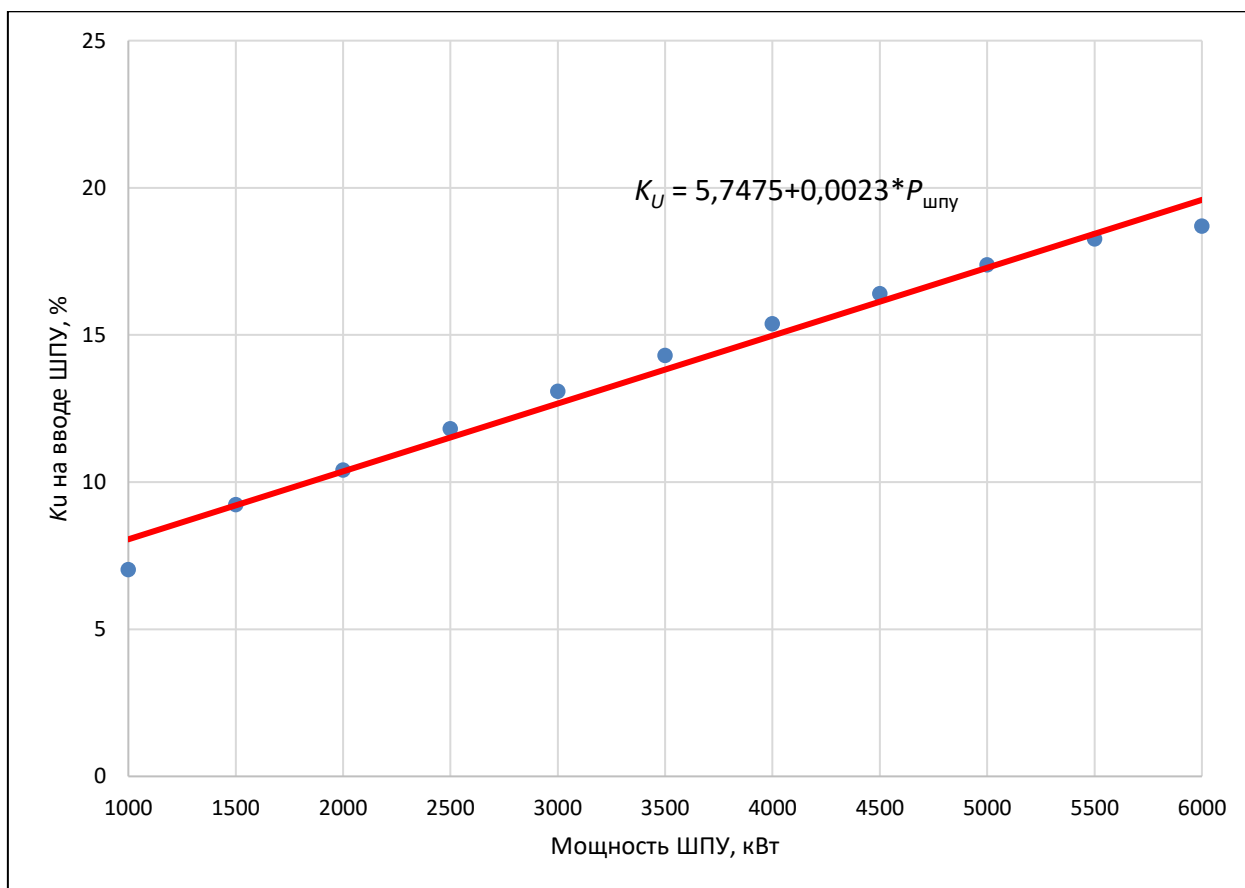


Рисунок 5.26 – Зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) на вводе ШПУ, от мощности ШПУ при фиксированной длине линии от ГПП до ШПУ ($L_{л}=100$ м)

Зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения, генерируемых преобразовательным устройством электроприводом ШПУ ($K_{U_{шпу}}$) от длины линии от ГПП до ШПУ при мощности электропривода ШПУ ($P_{шпу}=6000$ кВт) (рис.5.27) описывается выражением:

$$K_U = 18,745 - 0,0006 * L_{л} \quad (5.10)$$

Анализ зависимости суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения, генерируемых преобразовательным устройством электроприводом ШПУ ($K_{U_{шпу}}$) от длины линии от ГПП до ШПУ при мощности электропривода ШПУ ($P_{шпу}=6000$ кВт) показал его изменения ($K_{U_{шпу}}$) в диапазоне от 18,16 % до 18,70 %.

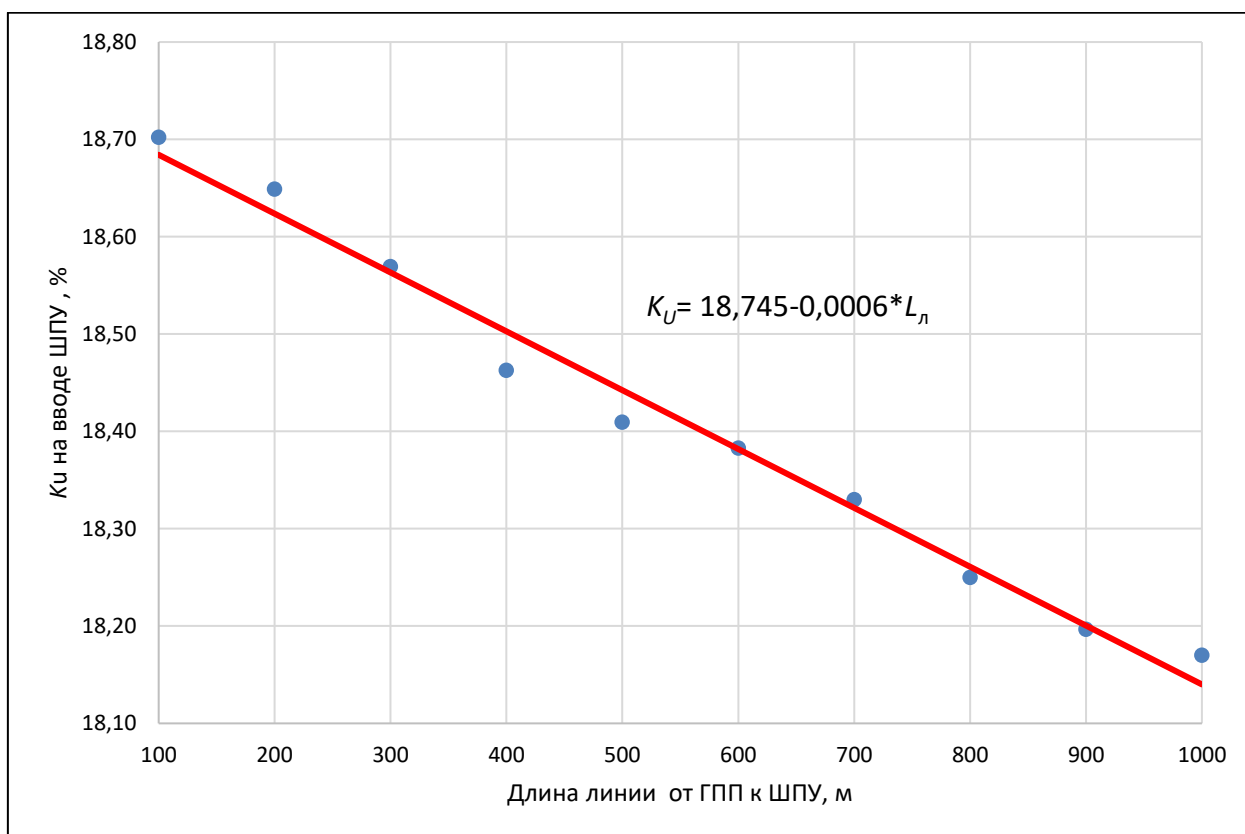


Рисунок 5.27 – Зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) на вводе ШПУ, от длины линии от ГПП до ШПУ ($L_{л}$) при фиксированной мощности ШПУ ($P_{шпу}=6000$ кВт)

Данные табл. 5.7 показывают, что суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения ($K_{U_{\text{шпу}}}$) имеет значения в диапазоне от 6,82 % до 18,70 %, что превышает требуемое по ГОСТ 32144–2013 равное 5 %.

Сравнение значений, полученных при моделировании режимов генерирования ВГС в ЭТС угольных шахт при применении трехобмоточных трансформаторов на ГПП, со значениями, полученными в ходе экспериментального исследования, приведенных в Главе 2 (табл. 2.1), представлены в табл. 5.8.

Таблица 5.8 - Оценка сходимости результатов имитационного моделирования с экспериментальными исследованиями ПКЭ в СЭС угольных шахт

Точка контроля	Параметры ЭТС		$K_U, \%$		Сходимость
	Мощность подъемной установки, кВт	Длина кабельной линии от ГПП до ШПУ	Экспериментальное исследование	Имитационное моделирование	
ПС - 35 «ш. им. В.Д. Ялевского» 110/35/6 (5 секция 6 кВ)	1500	500	12,7	13,84	0,92

Проведенные исследования показывают, хорошую сходимость результатов экспериментальных исследований и имитационного моделирования на уровне 0,92 при моделировании ЭТС угольной шахты.

Сравнительный анализ точности моделирования режимов генерирования ВГС в электрических сетях 6 кВ поверхностного комплекса угольных шахт при двухобмоточных трансформаторах на ГПП приведен в табл. 5.9.

Относительная погрешность моделирования оценивалась по формуле [155]:

$$\delta = 100 \left| \frac{x-X}{X} \right|, \quad (5.11)$$

где x – значение, полученное в ходе имитационного моделирования; X – значение, полученное в ходе проведенного эксперимента.

Таблица 5.9 – Сравнительный анализ точности моделирования режимов генерирования ВГС в электрических сетях 6 кВ поверхностного комплекса угольных шахт при двухобмоточных трансформаторах на ГПП

№		Показатель	Экспериментальное значение	Значение, полученное в ходе моделирования	δ , %
1	ПС-20 35/6 «шахты им. С.М. Кирова» (2 секция 6 кВ)	K_U , %	9,6	10,24	6,67

Анализ показал, что погрешность моделирования режимов генерирования ВГС в электрических сетях 6 кВ поверхностного комплекса угольных шахт соответствует значению 6,67 % для ГПП с двухобмоточными трансформаторами.

Выполнен сравнительный анализ результатов имитационного моделирования режимов генерирования ВГС преобразовательными устройствами систем управления электроприводами технологического оборудования поверхностного комплексов с результатами экспериментальных исследований, который показал достаточный уровень адекватности разработанных имитационных моделей ЭТС угольных шахт.

5.3 Исследование режимов ограничения высших гармонических составляющих в электротехнических системах поверхностного комплекса угольных шахт

5.3.1 Исследование режимов ограничения высших гармонических составляющих в электротехнических системах поверхностного комплекса угольных шахт с двухобмоточными трансформаторами на главной понизительной подстанции

Исследование режимов ограничений ВГС в ЭТС поверхностного комплекса угольных шахт проведено при включенном на шинах ГПП 6 кВ ФКУ.

В результате моделирования ЭТС угольных шахт получены значения суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) на шинах ГПП 6 кВ для диапазонов мощностей ШПУ и ФКУ настроенного на подавление 5, 7, 11 и 13 высших гармоник. Имитационное моделирование проведено при следующих параметрах: мощность ШПУ находится в диапазоне от 1000 до 6000 кВт, мощность ФКУ находится в диапазоне от 500 до 6000 квар.

Результаты моделирования приведены в табличном и графическом виде.

Значения суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) на шинах ГПП 6 кВ в зависимости от мощностей ШПУ ($P_{шпу}$) и ФКУ ($Q_{фку}$) приведены в табл. 5.10.

Данные таблицы показывают увеличение K_U при увеличении мощности ШПУ для определенных значений мощности ФКУ.

Значения коэффициента суммарного значения гармонических составляющих напряжения (K_U) находятся в диапазоне от 0,63 до 10,83 %. Для диапазонов мощности ШПУ 2000 – 6000 кВт и мощности ФКУ 500 – 1500 квар, значения K_U превышают требуемое ГОСТ 32144–2013 значение, равное 5 %.

Таблица 5.10 – Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения (K_U) на шинах ГПП (6 кВ) в зависимости от мощностей ШПУ ($P_{шпу}$) и ФКУ ($Q_{фку}$)*)

Мощность ФКУ, квар	Мощность ШПУ, кВт, ($U=6,6$ кВ)										
	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000
500	3,193	4,234	5,115	5,986	6,807	7,538	8,268	8,949	9,630	10,260	10,831
1000	2,232	2,983	3,524	4,124	4,615	4,945	5,536	5,966	6,426	6,486	7,267
1500	1,742	2,182	2,713	3,093	3,453	3,914	4,214	4,525	4,825	5,135	5,445
2000	1,451	1,802	2,212	2,563	2,853	3,103	3,393	3,624	3,924	4,144	4,384
2500	1,231	1,542	1,892	2,182	2,422	2,643	2,873	3,093	3,283	3,483	3,684
3000	1,081	1,351	1,662	1,872	2,072	2,312	2,482	2,653	2,853	3,043	3,193
3500	0,961	1,201	1,502	1,672	1,882	2,012	2,212	2,362	2,503	2,673	2,833
4000	0,881	1,071	1,341	1,532	1,672	1,842	2,022	2,122	2,272	2,382	2,503
4500	0,791	0,991	1,211	1,361	1,522	1,642	1,812	1,932	2,032	2,182	2,282
5000	0,731	0,901	1,131	1,271	1,401	1,542	1,632	1,752	1,862	2,002	2,092
5500	0,671	0,841	1,031	1,161	1,301	1,401	1,532	1,632	1,732	1,812	1,942
6000	0,631	0,791	0,981	1,101	1,191	1,311	1,421	1,522	1,602	1,692	1,782

*) Цветом выделены значения, превышающие требуемые ГОСТ 32144–2013 для уровня напряжения 6 кВ

Геометрической интерпретацией зависимости суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) на шинах ГПП 6 кВ от мощностей ШПУ ($P_{шпу}$) и ФКУ ($Q_{фку}$) является поверхность в трехмерном пространстве, приведенная на рис. 5.28.

Эмпирические зависимости для оценки суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) на шинах ГПП 6 кВ от мощностей ШПУ ($P_{шпу}$) и ФКУ ($Q_{фку}$) с двухобмоточными трансформаторами на ГПП приведены в табл. 5.11.

Зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) на шинах ГПП 6 кВ от мощности ФКУ ($Q_{фку}$) при фиксированном значении мощности ШПУ ($P_{шпу} = 6000$ кВт) соответствует выражению (рис.5.29):

$$K_U = 1176,46 * Q_{фку}^{-0,74}. \quad (5.11)$$

Анализ зависимости суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) на шинах ГПП 6 кВ от мощности ФКУ ($Q_{фку}$) при фиксированном значении мощности ШПУ ($P_{шпу} = 6000$ кВт) показал его изменения (K_U) в диапазоне от 1,782 % до 10,831 %.

Зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) на шинах ГПП 6 кВ от мощности ШПУ ($P_{шпу}$) при фиксированном значении мощности ФКУ ($Q_{фку} = 6000$ квар) соответствует выражению (5.30):

$$K_U = 0,49 + 0,0002 * P_{шпу}. \quad (5.12)$$

Анализ зависимости суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) на шинах ГПП 6 кВ от мощности ШПУ ($P_{шпу}$) при фиксированном значении мощности ФКУ ($Q_{фку} = 6000$ квар) показал его изменения (K_U) в диапазоне от 0,631 % до 1,782 %.

Для полученных эмпирических зависимостей выполнена оценка значения средней ошибки аппроксимации по шкале Чеддока, которая характеризуется очень высокой точностью, полученные значения \bar{A} находятся в диапазоне ($0\% < \bar{A} < 10\%$).

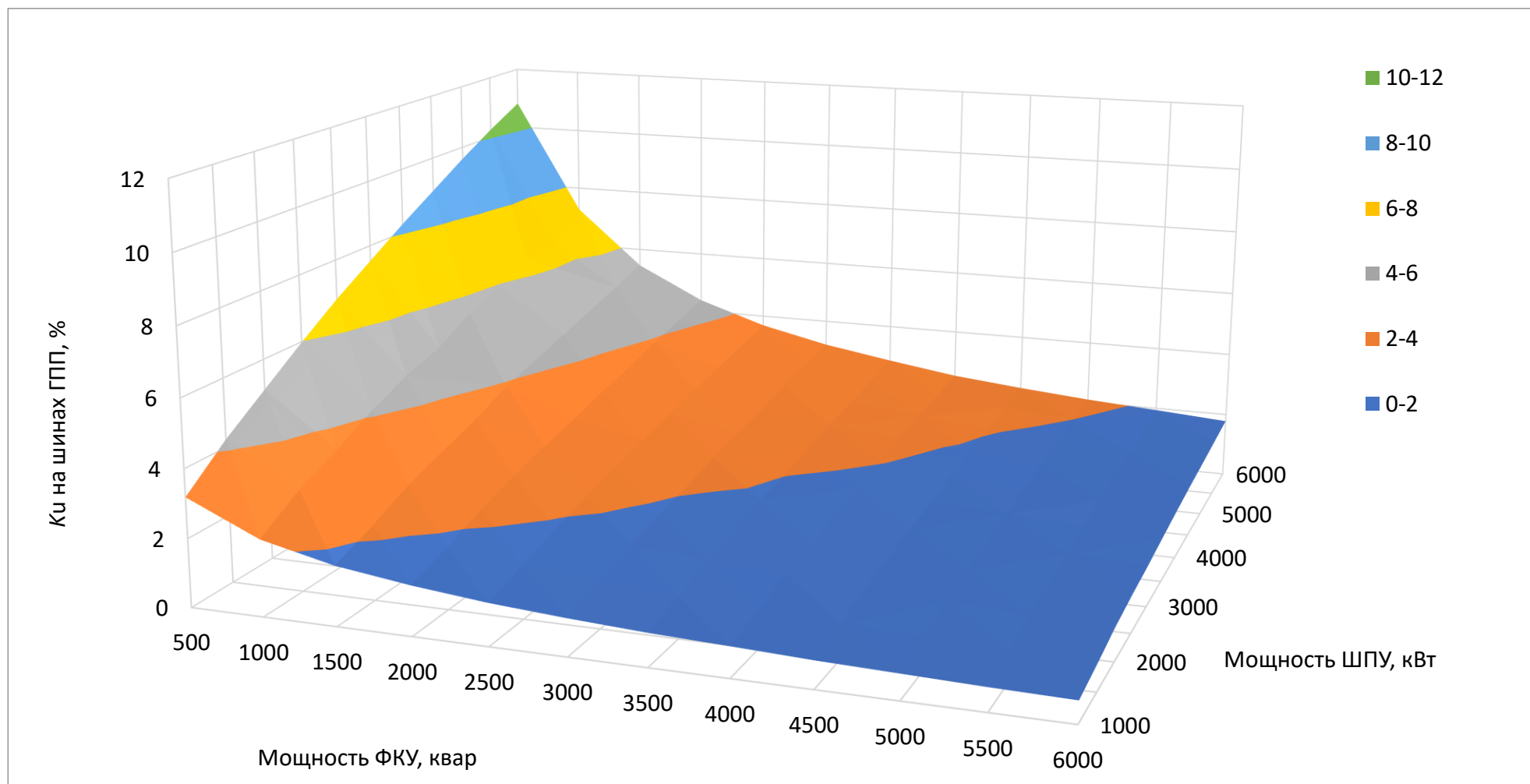


Рисунок 5.28 – Геометрическая интерпретация зависимости суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) на шинах ГПП 6 кВ с учетом мощностей ШПУ ($P_{шпу}$) и ФКУ ($Q_{фку}$) $K_{U_{ГПП}} = f(P_{шпу}, Q_{фку})$

Таблица 5.11 – Эмпирические зависимости для оценки суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) на шинах ГПП 6 кВ от мощностей ФКУ ($Q_{фку}$) и ШПУ ($P_{шпу}$) в ЭТС с двухобмоточными трансформаторами на ГПП

$K_U = f(Q_{фку}, P_{шпу} = const)$			$K_U = f(P_{шпу}, Q_{фку} = const)$		
$P_{шпу}$, кВт	Эмпирическая зависимость	\bar{A} , %	$Q_{фку}$, квар	Эмпирическая зависимость	\bar{A} , %
1000	$K_U = 219,493 * Q_{фку}^{-0,667}$	3,546	500	$K_U = 2,048 + 0,002 * P_{шпу}$	2,695
1500	$K_U = 345,061 * Q_{фку}^{-0,695}$	2,899	1000	$K_U = 1,576 + 0,001 * P_{шпу}$	3,144
2000	$K_U = 379,016 * Q_{фку}^{-0,681}$	3,010	1500	$K_U = 1,184 + 0,001 * P_{шпу}$	3,054
2500	$K_U = 501,967 * Q_{фку}^{-0,7}$	3,105	2000	$K_U = 1,015 + 0,001 * P_{шпу}$	2,873
3000	$K_U = 609,515 * Q_{фку}^{-0,711}$	2,910	2500	$K_U = 0,890 + 0,0005 * P_{шпу}$	3,275
3500	$K_U = 692,294 * Q_{фку}^{-0,716}$	2,944	3000	$K_U = 0,707 + 0,0004 * P_{шпу}$	2,818
4000	$K_U = 795,098 * Q_{фку}^{-0,723}$	3,078	3500	$K_U = 0,712 + 0,0004 * P_{шпу}$	3,347
4500	$K_U = 893,462 * Q_{фку}^{-0,729}$	2,838	4000	$K_U = 0,660 + 0,0003 * P_{шпу}$	3,757
5000	$K_U = 1016,404 * Q_{фку}^{-0,737}$	3,132	4500	$K_U = 0,588 + 0,0003 * P_{шпу}$	3,203
5500	$K_U = 1022,709 * Q_{фку}^{-0,731}$	3,004	5000	$K_U = 0,554 + 0,0003 * P_{шпу}$	3,544
6000	$K_U = 1176,463 * Q_{фку}^{-0,741}$	3,194	5500	$K_U = 0,508 + 0,0002 * P_{шпу}$	3,500
			6000	$K_U = 0,492 + 0,0002 * P_{шпу}$	3,755

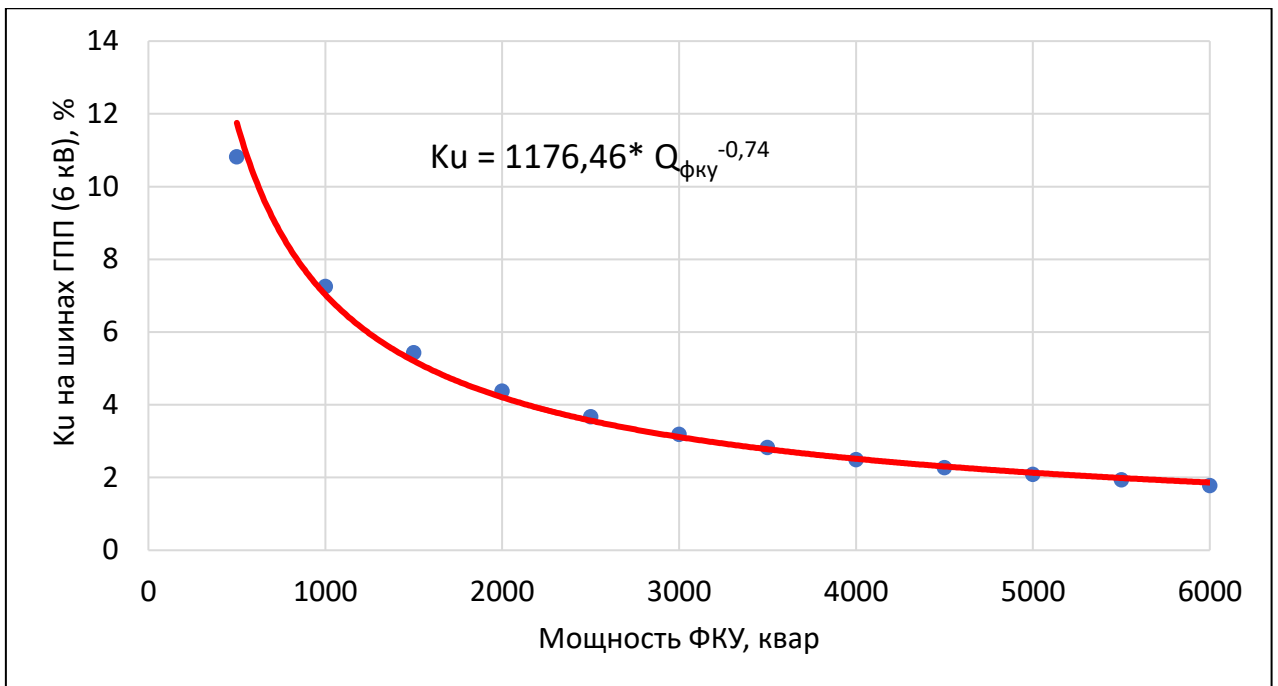


Рисунок 5.29 – Зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) на шинах ГПП 6 кВ от мощности ФКУ ($Q_{фкы}$) при фиксированном значении мощности ШПУ ($P_{шпу}=6000$ кВт)

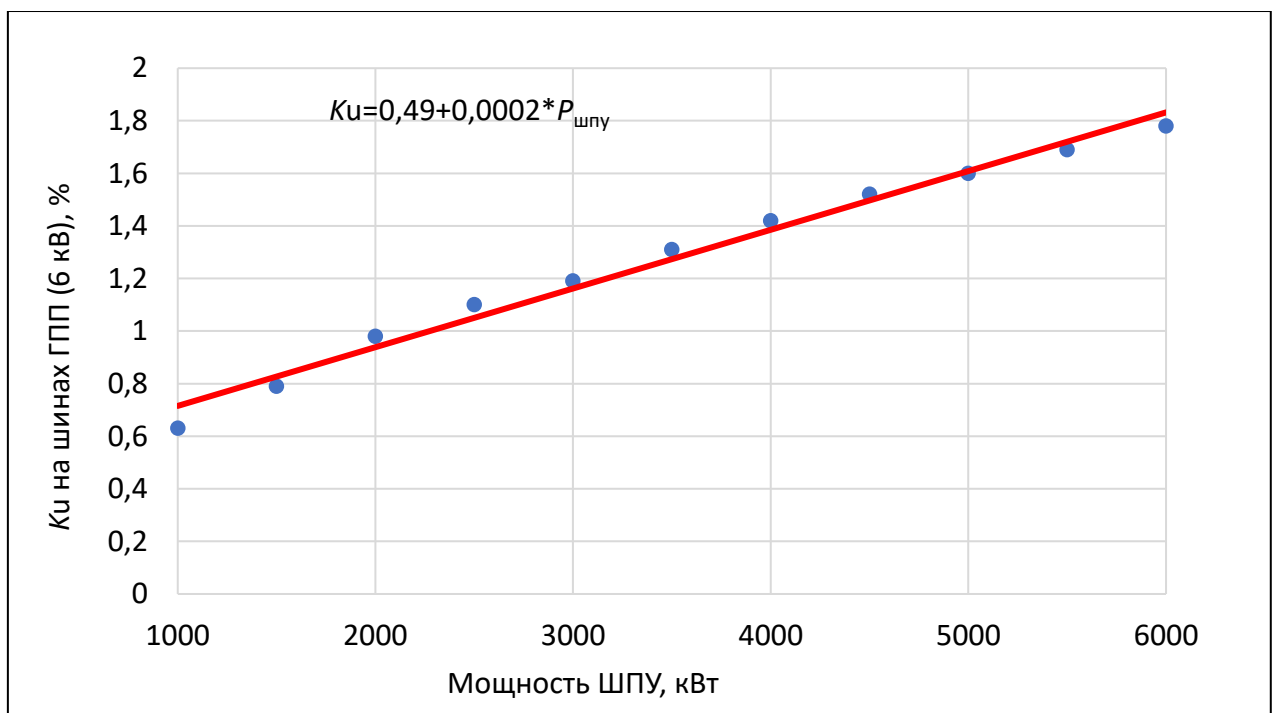


Рисунок 5.30 – Зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) на шинах ГПП 6 кВ от мощности ШПУ ($P_{шпу}$) при фиксированном значении мощности ФКУ ($Q_{фкы}=6000$ квар)

Имитационное моделирование ЭТС угольных шахт подтвердило возможность ограничения влияния ВГС с помощью пассивных ФКУ установленных на шинах ГПП, питающих мощные электропотребители с нелинейной нагрузкой (ШПУ).

Динамика значений ПКЭ до и после включения ФКУ приведена в табл. 5.12.

Анализ данных табл. 5.12 показывает, что диапазон суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) составлял 9,01 – 15,7 %, а после включения ФКУ составил 2,0 – 7,13 %, что является достаточно эффективным ограничением ВГС. Осциллограммы тока и напряжения в точках контроля (табл. 5.11) до и после подключения ФКУ, в ЭТС угольной шахты приедены в Приложении 7 (рис. П.7.1 – рис. П. 7.20).

В качестве примера на рис. 5.31 и 5.32 приведены синусоиды напряжения с искажениями, гармонические составы и суммарные коэффициент гармонических составляющих напряжения (K_U) на шинах ГПП 6 кВ.

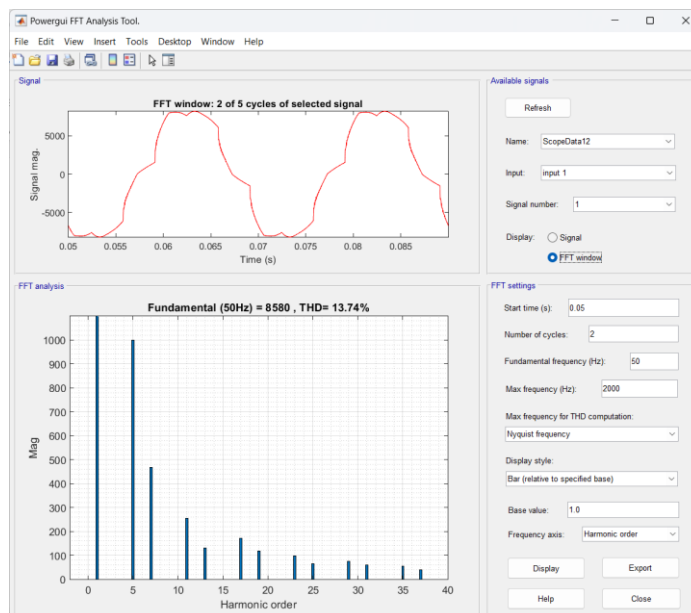


Рисунок 5.31 - Синусоида напряжения с искажениями, гармонический состав и суммарный коэффициент гармонических составляющих (K_U) на шинах ГПП 6кВс отключенным ФКУ ($P_{шпу}=4000$ кВт, $L_{в\gamma}=1000$ м)

Таблица 5.12 - ПКЭ до и после включения ФКУ на ГПП

Точка контроля	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 (6кВ) (1 секция)	6,10	-0,50	-8,41	13,74	6,48	-0,12	-1,98	3,39
Шахтная подъемная установка 1	5,93	-0,67	-11,2	15,57	6,11	-0,49	-8,10	7,13
Выемочный участок	6,04	-0,56	-9,35	10,39	6,38	-0,23	-3,75	2,65
Участок конвейерного транспорта	6,05	-0,55	-9,15	9,80	6,37	-0,23	-3,78	2,67
Шины ГПП (6кВ) (2 секция)	6,06	-0,54	-9,07	9,49	6,42	-0,18	-2,97	2,11
Участок водоотлива	6,06	-0,54	-9,06	9,39	6,42	-0,18	-2,95	2,07
Главная вентиляторная установка	6,06	-0,54	-9,06	9,31	6,43	-0,17	-2,78	2,00
Проходческий участок 1	6,08	-0,52	-8,73	9,07	6,41	-0,19	-3,21	2,34
Шахтная подъемная установка 2	5,96	-0,65	-10,75	14,21	6,12	-0,48	-8,01	7,09
Проходческий участок 2	6,08	-0,52	-8,69	9,01	6,42	-0,18	-3,02	2,19

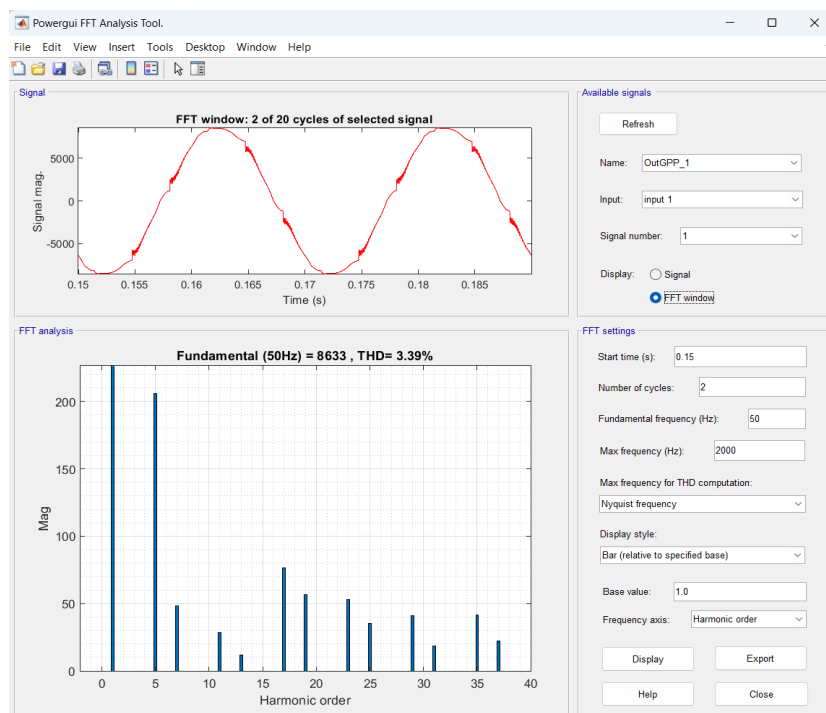


Рисунок 5.32 - Синусоида напряжения с искажениями, гармонический состав и суммарный коэффициент гармонических составляющих (K_U) на шинах ГПП после включения ФКУ ($Q_{ФКУ}=2000$ квар) ($P_{пу}=4000$ кВт, $L_{вв}=1000$ м)

На рис. 5.31 приведены данные для момента моделирования при мощности электропривода ШПУ, равной 4000 кВт, длине кабельной линии от ЦПП до выемочного участка 1000 м, при этом значение K_U составило 13,74 %.

На рис. 5.32 приведены данные для момента моделирования при мощности электропривода ШПУ, равной 4000 кВт, длине кабельной линии от ЦПП до выемочного участка 1000 м и мощности ФКУ равном 2000 квар при этом значение K_U составило 3,39 %.

Анализ параметров, полученных в ходе моделирования ЭТС угольной шахты с двухобмоточными трансформаторами на ГПП, подтвердил снижение K_U со значений 13,74 до 3,39 % (нормативное значение – 5%).

Проведенное исследование подтверждает эффективность использования ФКУ для ограничения влияния высших гармонических составляющих в ЭТС поверхностного комплекса угольных шахт с двухобмоточными трансформаторами на ГПП.

5.3.2 Исследование режимов ограничения влияния высших гармонических составляющих в электротехнических системах поверхностного комплекса угольных шахт с трехобмоточными трансформаторами на главной понизительной подстанции путем применения фильтрокомпенсирующих устройств

Исследование режимов ограничений ВГС в ЭТС поверхностного комплекса угольных шахт проведено при включенном на шинах ГПП 6 кВ ФКУ.

В результате моделирования ЭТС угольных шахт получены значения суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) на шинах ГПП 6 кВ для диапазонов мощностей ШПУ и ФКУ настроенного на подавление 5, 7, 11 и 13 высших гармоник. Имитационное моделирование проведено при следующих параметрах: мощность ШПУ находится в диапазоне от 1000 до 6000 кВт, мощность ФКУ находится в диапазоне от 500 до 6000 квар.

Результаты моделирования приведены в табличном и графическом виде.

Значения суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) на шинах ГПП 6 кВ в зависимости от мощностей ШПУ ($P_{шпу}$) и ФКУ ($Q_{фку}$) приведены в табл. 5.13.

Данные таблицы показывают увеличение K_U при увеличении мощности ШПУ для определенных значений мощности ФКУ.

Значения коэффициента суммарного значения гармонических составляющих напряжения (K_U) находятся в диапазоне от 0,63 до 10,91 %. Для диапазонов мощности ШПУ 2000 – 6000 кВт и мощности ФКУ 500 – 1500 квар, значения K_U превышают требуемое ГОСТ 32144–2013 значение, равное 5 %.

Геометрической интерпретацией зависимости суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) на шинах ГПП (6 кВ) с учетом мощностей ШПУ ($P_{шпу}$) и ФКУ ($Q_{фку}$) является поверхность в трехмерном пространстве, приведенная на рис. 5.33.

Таблица 5.13 – Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения (K_U) на шинах ГПП (6 кВ) в зависимости от мощностей ШПУ ($P_{шпу}$) и ФКУ ($Q_{фку}$)*)

Мощность ФКУ, квар	Мощность ШПУ, кВт, ($U=6,6$ кВ)										
	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000
500	3,197	4,238	5,156	5,992	6,814	7,597	8,334	8,959	9,687	10,332	10,906
1000	2,234	2,986	3,527	4,128	4,619	4,979	5,569	5,971	6,432	6,544	7,332
1500	1,756	2,197	2,716	3,118	3,457	3,918	4,244	4,529	4,830	5,141	5,451
2000	1,453	1,803	2,214	2,580	2,873	3,106	3,424	3,645	3,926	4,181	4,387
2500	1,232	1,543	1,905	2,184	2,424	2,644	2,876	3,096	3,287	3,487	3,686
3000	1,089	1,363	1,663	1,874	2,074	2,314	2,484	2,668	2,873	3,070	3,215
3500	0,970	1,211	1,515	1,685	1,895	2,014	2,214	2,365	2,525	2,689	2,836
4000	0,886	1,079	1,342	1,533	1,682	1,844	2,024	2,124	2,275	2,385	2,505
4500	0,796	0,992	1,212	1,363	1,532	1,653	1,813	1,934	2,050	2,195	2,298
5000	0,737	0,909	1,139	1,273	1,410	1,543	1,633	1,754	1,864	2,004	2,094
5500	0,671	0,842	1,032	1,162	1,303	1,403	1,542	1,633	1,734	1,824	1,954
6000	0,631	0,792	0,981	1,102	1,192	1,320	1,430	1,523	1,603	1,702	1,794

*) Цветом выделены значения, превышающие требуемые ГОСТ 32144–2013 для уровня напряжения 6 кВ

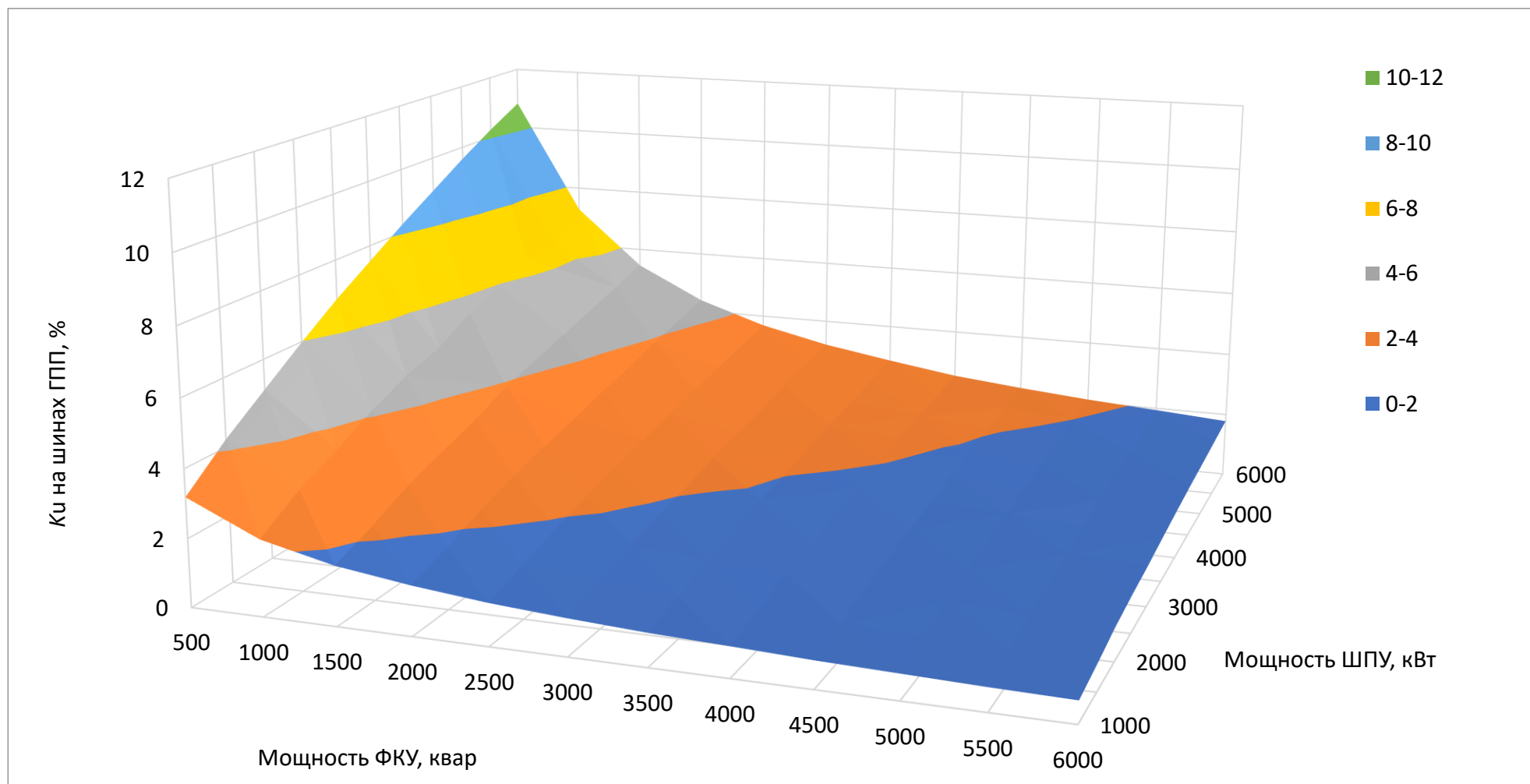


Рисунок 5.33 – Геометрическая интерпретация зависимости суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) на шинах ГПП (6 кВ) с учетом мощностей ШПУ ($P_{шпу}$) и ФКУ ($Q_{фку}$) $K_{U_{гпп}} = f(P_{шпу}, Q_{фку})$

Данные табл. 5.12 показывают, что суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения (K_U) имеет значения в диапазоне от 0,631 % до 10,906 %, что соответствует требуемому по ГОСТ 32144–2013 - 5 % (за исключением $Q_{\text{фкУ}} = 500$ квар для мощностей ШПУ от 2000 до 6000 кВт, $Q_{\text{фкУ}} = 1000$ квар для мощностей ШПУ от 4000 до 6000 кВт, $Q_{\text{фкУ}} = 1500$ квар для мощностей ШПУ от 5000 до 6000 кВт).

Зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) на шинах ГПП (6 кВ) от мощности ФКУ ($Q_{\text{фкУ}}$) при фиксированном значении мощности ШПУ ($P_{\text{шпу}} = 5000$ кВт) (рис. 5.34) соответствует выражению:

$$K_U = 1016,404 * Q_{\text{фкУ}}^{-0,737}. \quad (5.13)$$

Анализ зависимости суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) на шинах ГПП 6 кВ от мощности ФКУ ($Q_{\text{фкУ}}$) при фиксированном значении мощности ШПУ ($P_{\text{шпу}} = 5000$ кВт) показал его изменения (K_U) в диапазоне от 1,603 % до 9,687 %.

Зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) на шинах ГПП (6 кВ) от мощности ШПУ ($P_{\text{шпу}}$) при фиксированном значении мощности ФКУ ($Q_{\text{фкУ}} = 500$ квар) соответствует выражению (рис. 5.35):

$$K_U = 2,048 + 0,002 * P_{\text{шпу}}. \quad (5.14)$$

Анализ зависимости суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) на шинах ГПП 6 кВ от мощности ШПУ ($P_{\text{шпу}}$) при фиксированном значении мощности ФКУ ($Q_{\text{фкУ}} = 500$ квар) показал его изменения (K_U) в диапазоне от 3,197 % до 10,906 %.

В качестве примера на рис. 5.36 и 5.37 приведены синусоиды напряжения с искажениями, гармонические составы и суммарные коэффициент гармонических составляющих напряжения (K_U) на шинах ГПП 6 кВ при применении трехобмоточных трансформаторов.

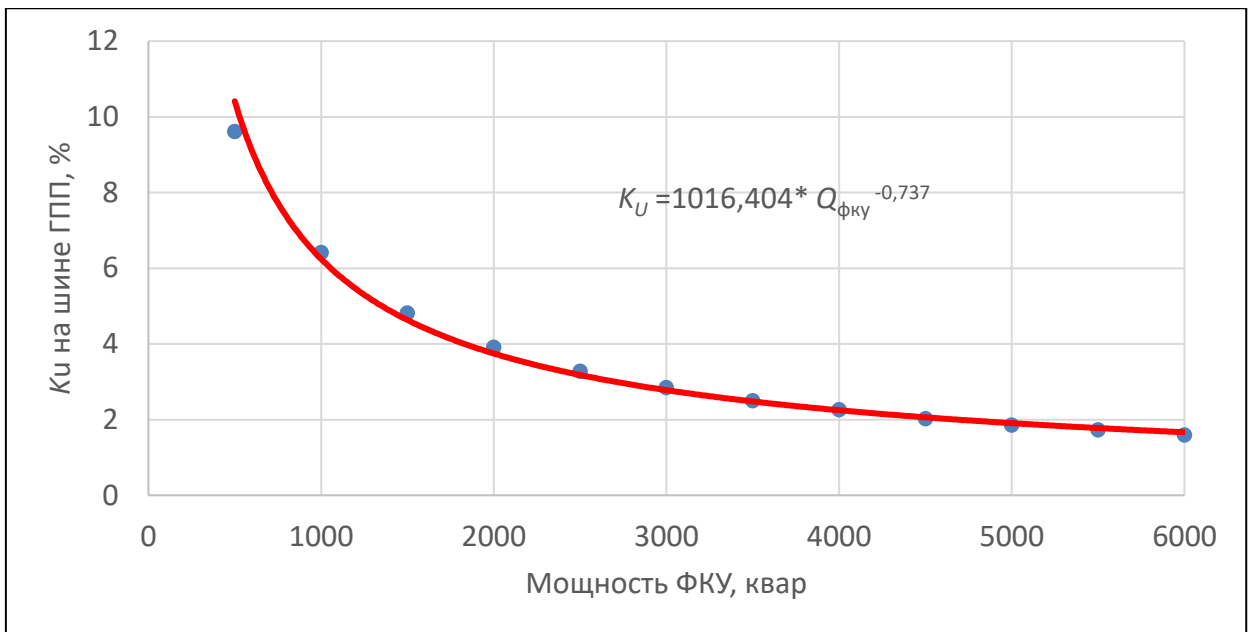


Рисунок 5.34 - Зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) на шинах ГПП (6 кВ) с ФКУ от мощности ФКУ ($Q_{\text{ФКУ}}$) при фиксированном значении мощности ШПУ ($P_{\text{шпу}} = 5000$ кВт)

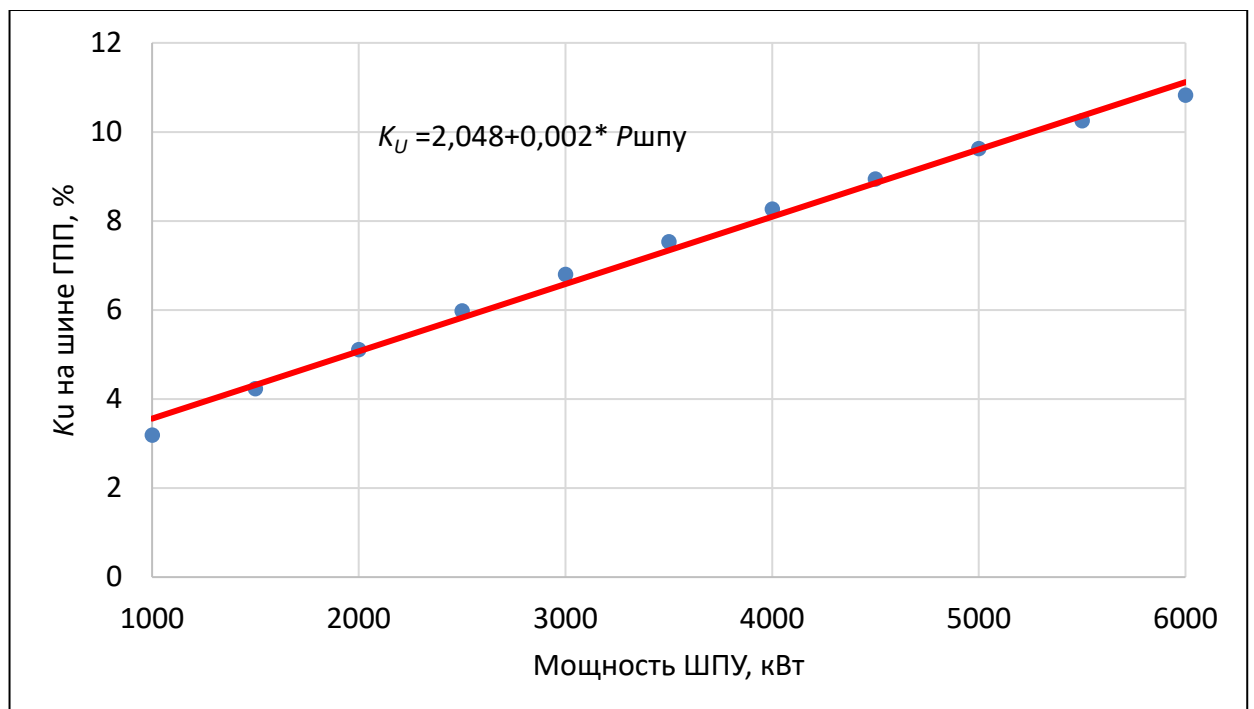


Рисунок 5.35 - Зависимость суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) на шинах ГПП (6 кВ) с ФКУ от мощности ШПУ ($P_{\text{шпу}}$) при фиксированном значении мощности ФКУ ($Q_{\text{ФКУ}} = 500$ квар)

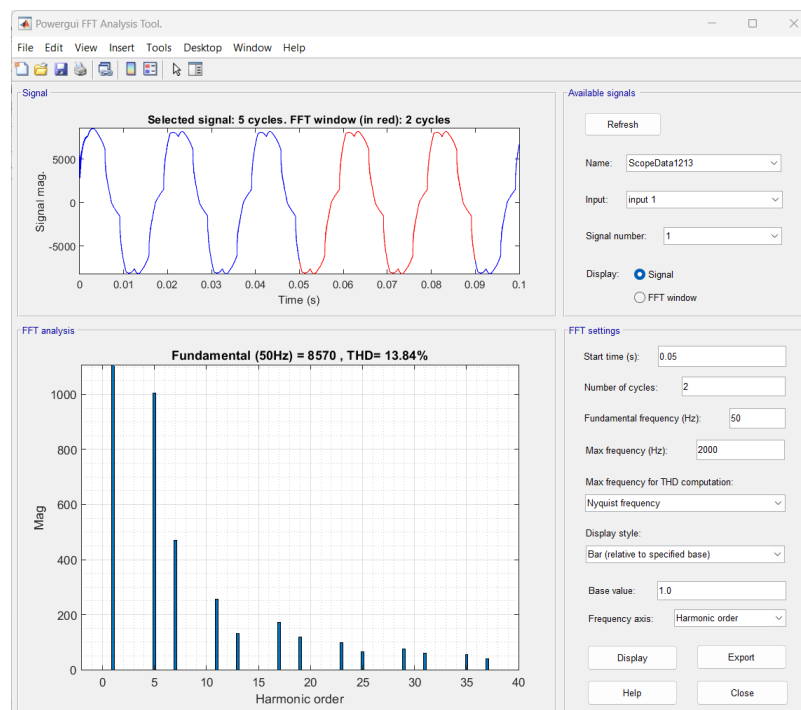


Рисунок 5.36 - Синусоида напряжения с искажениями, гармонический состав и суммарный коэффициент гармонических составляющих (K_U) на вводе ШПУ с отключенным ФКУ ($P_{шпу}=3500$ кВт, $L_{бу}=500$ м)

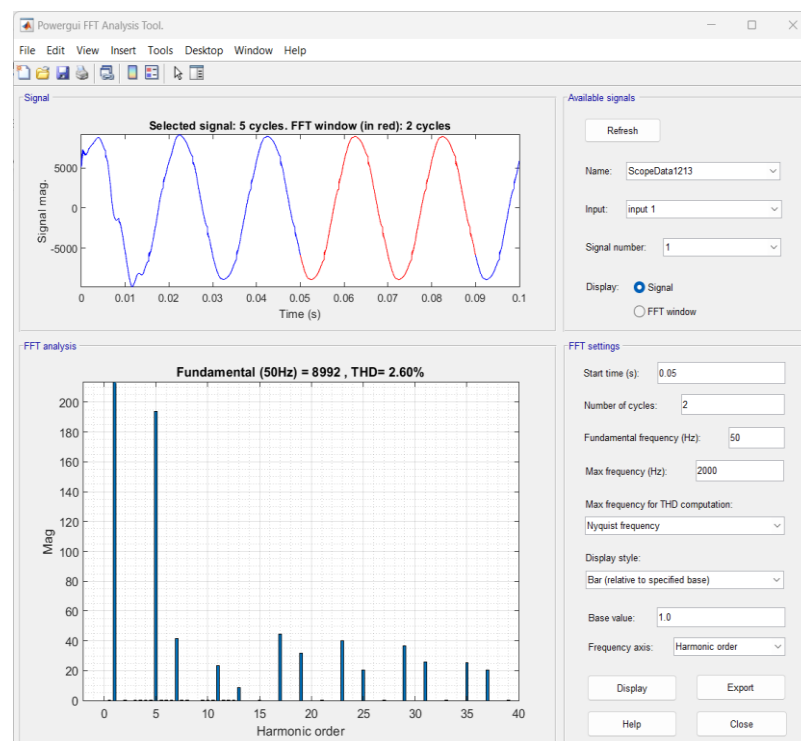


Рисунок 5.37 - Синусоида напряжения с искажениями, гармонический состав и суммарный коэффициент гармонических составляющих (K_U) на вводе ШПУ после включения ФКУ ($P_{шпу}=3500$ кВт, $L_{бу}=500$ м, $Q_{фку}=2500$ квар)

На рис. 5.36 приведены данные для момента моделирования при мощности электропривода ШПУ, равной 3500 кВт, длине кабельной линии от ШПУ до ГПП равного 500 м, при этом значение K_U составило 13,84 %.

На рис. 5.37 приведены данные для момента моделирования при мощности электропривода ШПУ, равной 3500 кВт, длине кабельной линии от ШПУ до ГПП равного 500 м и подключенным ФКУ равным 2500 квар при этом значение K_U составило 2,60 %.

Анализ параметров, полученных в ходе моделирования ЭТС угольной шахты с трехобмоточными трансформаторами на ГПП, подтвердил снижение K_U со значений 13,84 до 2,60 % (нормативное значение – 5%).

Проведенное исследование подтверждает эффективность использования ФКУ для ограничения влияния высших гармонических составляющих в ЭТС поверхностного комплекса угольных шахт с трехобмоточными трансформаторами на ГПП.

Оценка сходимости результатов моделирования суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) на шинах (6 кВ) в зависимости от мощностей ШПУ ($P_{шпу}$) и ФКУ ($Q_{фку}$) при двухобмоточных и трехобмоточных трансформаторах на ГПП, в процентах приведены в табл. 5.14.

Анализ результатов сходимости при двухобмоточных и трехобмоточных трансформаторах на ГПП показал, что значения 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 ($Q_{фку}$) и ШПУ ($P_{шпу}$), приведенные в табл. 5.9.

Проведенный анализ результатов имитационного моделирования режимов ограничения ВГС в ЭТС поверхностного комплекса угольных шахт путем применения ФКУ с двухобмоточными и трехобмоточными трансформаторами на ГПП показал идентичные результаты в виде значения

Таблица 5.14 – Оценка сходимости результатов моделирования суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) на шинах (6 кВ) в зависимости от мощностей ШПУ ($P_{шпу}$) и ФКУ ($Q_{фку}$) при двухобмоточных и трехобмоточных трансформаторах на ГПП, в процентах

Мощность ФКУ, квар	Мощность ШПУ, кВт, ($U=6,6$ кВ)										
	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000
500	0,11	0,09	0,79	0,10	0,10	0,79	0,79	0,11	0,60	0,70	0,70
1000	0,09	0,10	0,09	0,09	0,09	0,70	0,60	0,09	0,09	0,89	0,89
1500	0,79	0,70	0,11	0,79	0,10	0,10	0,70	0,10	0,10	0,11	0,10
2000	0,11	0,05	0,10	0,70	0,70	0,10	0,89	0,60	0,05	0,89	0,05
2500	0,05	0,10	0,70	0,10	0,05	0,79	0,10	0,11	0,11	0,10	0,05
3000	0,70	0,89	0,10	0,11	0,11	0,09	0,05	0,60	0,70	0,89	0,70
3500	0,89	0,79	0,89	0,79	0,70	0,11	0,09	0,10	0,89	0,60	0,10
4000	0,60	0,70	0,05	0,09	0,60	0,11	0,10	0,10	0,11	0,11	0,11
4500	0,70	0,10	0,05	0,10	0,70	0,70	0,09	0,09	0,89	0,60	0,70
5000	0,79	0,89	0,70	0,11	0,60	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
5500	0,10	0,09	0,09	0,11	0,10	0,10	0,70	0,11	0,11	0,70	0,60
6000	0,10	0,10	0,05	0,10	0,10	0,70	0,60	0,10	0,10	0,60	0,70

суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (K_U) на шинах ГПП (6 кВ) в зависимости от мощностей ШПУ ($P_{шпу}$) и ФКУ ($Q_{фку}$).

Сравнительный анализ точности моделирования режимов генерирования ВГС в электрических сетях 6 кВ поверхностного комплекса угольных шахт при трехобмоточных трансформаторах на ГПП приведен в табл. 5.15.

Относительная погрешность моделирования оценивалась по формуле [155]:

$$\delta = 100 \left| \frac{x-X}{X} \right|, \quad (5.15)$$

где x – значение, полученное в ходе имитационного моделирования; X – значение, полученное в ходе проведенного эксперимента.

Таблица 5.15 – Сравнительный анализ точности моделирования режимов генерирования ВГС в электрических сетях 6 кВ поверхностного комплекса угольных шахт при трехобмоточных трансформаторах на ГПП

№	Показатель	Экспериментальное значение	Значение, полученное в ходе моделирования	δ , %	
1	ПС - 35 110/35/6 «шахты им. В.Д. Ялевского» (5 секция 6 кВ)	K_U , %	12,7	13,84	8,98

Анализ показал, что погрешность моделирования режимов генерирования ВГС в электрических сетях 6 кВ поверхностного комплекса угольных шахт соответствует значению 8,98 % для ГПП с трехобмоточными трансформаторами.

Выполнен сравнительный анализ результатов имитационного моделирования режимов генерирования ВГС преобразовательными устройствами систем управления электроприводами технологического оборудования поверхностного комплексов с результатами экспериментальных исследований, который показал достаточный уровень адекватности разработанных имитационных моделей ЭТС угольных шахт.

Выполненное исследование подтверждает эффективность использования ФКУ для ограничения ВГС в ЭТС поверхностного комплекса угольных шахт.

5.4 Выводы

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 ($Q_{фку}$) и ШПУ ($P_{шпу}$) без учета применения двух - и трехобмоточных трансформаторов.

Глава 6. Реализация научно-технических решений для обеспечения повышения эффективности функционирования электротехнических систем угольных шахт

6.1 Методическая поддержка обеспечения повышения обеспечения повышения эффективности функционирования электротехнических систем угольных шахт

Выполнено исследование режимов генерирования ВГС в ЭТС угольных шахт на основе комплексного подхода, с применением методов измерения электрических величин, теории электроснабжения промышленных предприятий, вероятностно-статистической обработки результатов экспериментальных исследований и имитационного моделирования, корреляционно-регрессионного анализа, преобразований Кларк, сложных ЭТС угольных шахт, в том числе опасных по внезапным выбросам газа и пыли.

Для исследования ПКЭ в ЭТС угольных шахт разработаны:

1. Методика экспериментального исследования ПКЭ в системах электроснабжения угольных шахт.
2. Методика имитационного моделирования режимов генерирования ВГС в ЭТС угольных шахт.
4. Методика выбора средств повышения показателей качества электроэнергии в подземных участковых ЭТС.

Разработанные методики обеспечивают порядок проведения исследований ПКЭ в ЭТС угольных шахт, включающие: экспериментальные исследования ПКЭ; имитационное моделирование режимов генерирования ВГС; обоснование, выбор и применение средств повышения показателей качества электроэнергии в подземных электрических сетях.

Выполненное исследование показателей качества электроэнергии для повышения эффективности функционирования ЭТС угольных шахт позволяет:

- ограничивать суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения в требуемых ГОСТ 32144-2013 пределах;
- снизить риски ускоренного старения изоляции кабельных линий и, как следствие, снижение вероятности аварийных отключений электроэнергии;
- повысить устойчивость работы микропроцессорных устройств с уменьшением неселективной работы релейной защиты;
- позволяет снизить простои технологического оборудования с повышением его коэффициента использования;
- поддерживать требуемое значение отклонения питающей напряжения в ЭТС угольных шахт $\pm 10\%$;

Применение Методики имитационного моделирования режимов генерирования ВГС в подземных участковых ЭТС угольных шахт позволяет:

- определять гармонический состав по току и напряжению, а также их уровень в подземных участковых ЭТС угольных шахт;
- определять параметры ФКУ для обеспечения нормативных значений суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения в подземных участковых ЭТС угольных шахт;
- устанавливать место размещения ФКУ в подземных участковых ЭТС угольных шахт.

Применение Методики имитационного моделирования режимов генерирования ВГС в ЭТС угольных шахт позволяет:

- определять гармонический состав, суммарные коэффициенты гармонического состава по току и напряжению в ЭТС угольных шахт, включая подземные и поверхностные электрические сети;
- определить параметры ФКУ для обеспечения требуемых значений ПКЭ согласно ГОСТ 32144-2013 в ЭТС угольных шахт;

Разработанные рекомендации и методики по обеспечению качества электроэнергии для повышения эффективности функционирования ЭТС угольных шахт приняты к внедрению в:

Институте проблем комплексного освоения недр Российской академии наук;

Акционерном обществе «Русский уголь»;

Угольном департаменте АО «Арселормиттал Темиртау» (шахта им. Костенко, шахта Саранская);

Угольном департаменте АО «*QARMET*» (шахта им. Кузембаева).

Материалы по внедрению приведены в Приложении 8.

6.2 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, предложена структура устройства мониторинга ПКЭ и компенсации влияния ВГС в подземных участковых электрических сетях угольных шахт.

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 синусоиду. В результате взаимодействия указанных токов происходит улучшение формы синусоиды путем взаимной компенсации и получении в результате тока синусоидальной формы без недопустимых искажений [33, 63, 172, 182].

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 и 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 [133, 134, 162, 168, 170, 172, 182]. Структурная схема устройства приведена на рис. 6.3 включает:

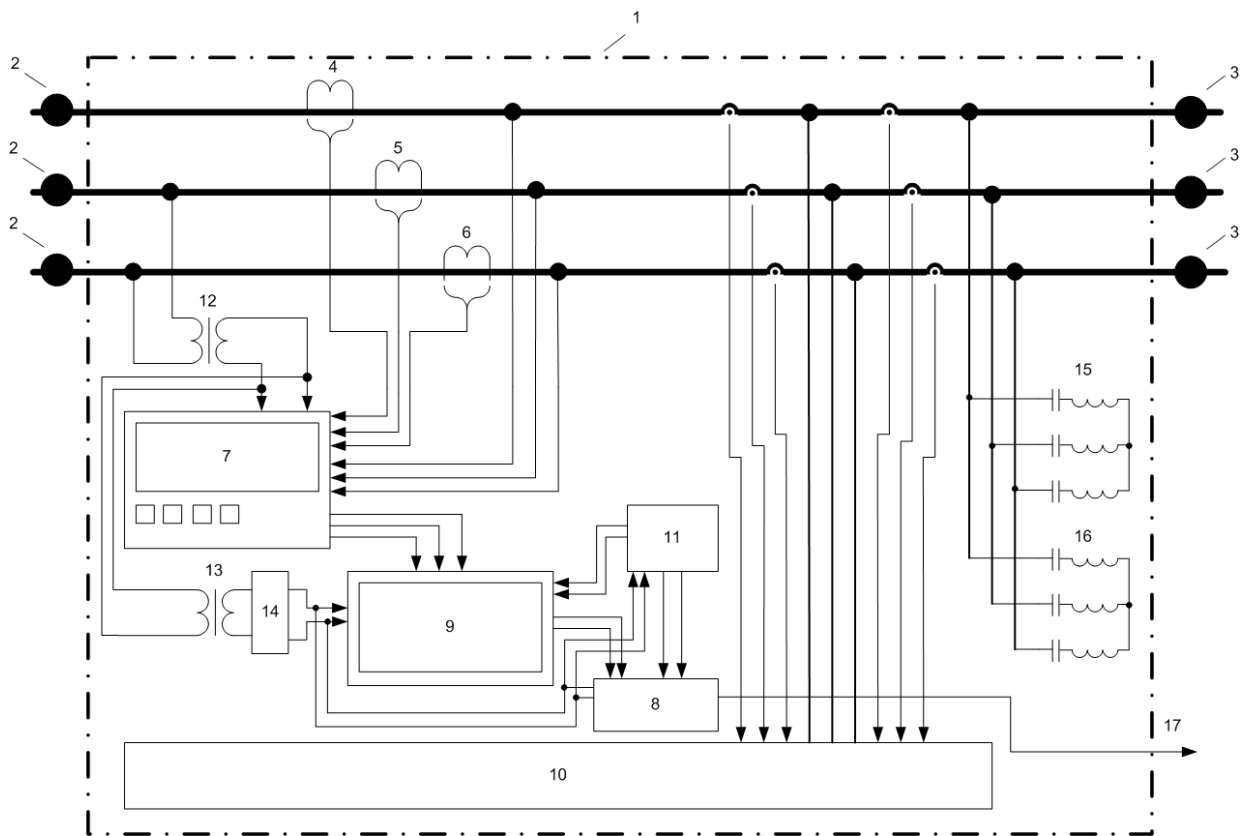


Рисунок 6.3 - Структурная схема устройства мониторинга ПКЭ и компенсации влияния ВГС в подземных участковых электрических сетях угольных шахт, в том числе опасных по внезапным выбросам газа и пыли

- 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.

Устройство предусматривает технологию Ethernet (10/100 mb/s), которая организована по оптическим линиям связи [133, 134, 162, 168, 170, 172, 182].

Устройство мониторинга ПКЭ и компенсации влияния ВГС в подземных участковых электрических сетях угольных шахт во взрывозащищенной оболочке 1 подключается между источником питания 2 и потребителем 3. При этом через устройство протекает ток, величина которого, преобразуемая в значения, удобные для измерения с помощью измерительных трансформаторов тока 4, 5, 6, поступает на анализатор ПКЭ 7, на который подключен к электрической сети. Питание анализатора ПКЭ 7 осуществляется от понижающего трансформатора 12. С анализатора ПКЭ 7 сигналы управления поступают на медиаконвертер 8, служащий преобразователем сигналов для дальнейшей их передачи по оптическим линиям связи с защищенную сеть Etherne, а также на запоминающее устройство 9. Напряжение и ток поступает на КФКУ, состоящий из АФВГ 10 и ПФ ВГС 15 и 16, которые ограничивают уровень ВГС на подземную участковую электрическую сеть. Для питания медиаконвертера 9 и запоминающего устройства 9 предусмотрен понижающий трансформатор 13 с неуправляемым выпрямителем 14, производящий подзарядку аккумуляторных батарей 11, служащих для резервного питания устройства [133, 134, 162, 168, 170, 172, 182].

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, а также учет электротехнических показателей, что позволит повысить эффективность функционирования подземных участков ЭТС угольных шахт, в том числе опасных по внезапным выбросам газа и пыли [133, 134, 162, 168, 170, 172, 182].

6.3 Кадровая поддержка обеспечения повышения эффективности функционирования электротехнических систем

Разработанные рекомендации и методики, а также основные результаты исследований внедрены в учебный процесс по направлению: 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» (образовательный трек «Управление энергетическими ресурсами предприятий») по дисциплинам «Электроснабжение», «Промышленная электроника»; 21.05.04 направление «Горное дело» (образовательный трек «Электротехнические системы, машины и оборудование горных предприятий») по дисциплинам: «Электроснабжение горных предприятий», «Промышленная электроника».

Справка о внедрении результатов диссертационной работы в учебный процесс, утвержденная Проректором по учебной работе НИТУ МИСИС Волковым А.А., приведена в Приложении 8.

6.5 Выводы

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 $\pm 10\%$.

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.

Литература

1. Абрамов Б.И., Иванов А.Г., Шиленков В.А., Кузьмин И.К., Шевырев Ю.В. Электропривод современных шахтных подъемных машин // ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень / МИАВ. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2022;(5—2) с.145—162
2. Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А. Проблемы обеспечения энергетической безопасности предприятий минерально-сырьевого комплекса // Записки Горного института. 2016. Т. 217. С. 132–139.
3. Алексеев В.В., Шевырев Ю.В., Акимов В.Д. Основы автоматики и автоматизация горных и геологоразведочных работ. М.: ОАО «Издательство «Недра»», 1998. – 423 с.
4. Андрижевский А.А., Володин В.И. Энергосбережение и энергетический менеджмент. – Минск: Высшая школа, 2005. – 294 с.
5. Аракелов В.Е., Кремер А.И. Методические вопросы экономии энергоресурсов. – М., Энергоатомиздат, 1990. – 192 с.
6. Афанасьев А.Ю., Газизов И.Ф., Кунгурцев А.А. Активный фильтр высших гармоник токов трехфазной сети // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2016. Т. 72. № 3. С. 32-36.
7. Афанасьев А.Ю., Газизов И.Ф., Кунгурцев А.А. Моделирование активного фильтра высших гармоник токов трехфазной сети в среде Matlab – Simulink // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2017. Т. 73. № 2. С. 5-11.
8. Бабокин Г.И. Шевырев Ю.В., Шевырева Н.Ю. Исследование качества электроэнергии очистного забоя угольной шахты // Горный журнал. 2021. № 7. С. 80-85.
9. Бабокин Г.И., Щуцкий В.И., Серов В.И. Частотно-регулируемый электропривод горных машин и установок. – М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 1998. – 240 с.

10. Батищев В.Е., Мартыненко Б.Г., Сысков С.Л., Щелоков Я.М. Энергосбережение: справочное пособие. Издание 2-е. – Екатеринбург: Экспресс, 2000. – 340 с.
11. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 392 с.
12. Беляк В.Л. Повышение эффективности систем подземного электроснабжения высокопроизводительных угольных шахт в связи с технологическим и энергомеханическим перевооружением отрасли: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 Москва, 2009. - 157 с.
13. Беляк В.Л. Технико-экономическое обоснование уровня номинального напряжения электродвигателей высоко энерговооруженных очистных комплексов. - Материалы научного семинара на секции ЭЭГП МГГУ 30 января 2008г. - М.: МГГУ., 2008. - С. 14-23.
14. Беляк В.Л., Залогин А.С. Миновский Ю.П., Семерников Н.И. Безопасное применение забойных машин при напряжении питания 3300 В// Безопасность труда в промышленности – 2005-№ 1- С. 73-75.
15. Беляк В.Л., Миновский Ю.П. Обеспечение электробезопасности в шахтных участковых сетях напряжением 3300 В. // Безопасность труда в промышленности – 2007 - № 9.
16. Беляк В.Л., Плащанский Л.А. Увеличение напряжения участковых сетей как способ повышения эффективности использования горных машин в высоконагруженных забоях угольных шахт - М.: Горный информационно-аналитический бюллетень МГГУ – 2007 - № 9 – С. 286-290.
17. Борисов Б.Д., Трохин Е.В., Шишенков В.А. Задачи и пути совершенствования электропривода горных машин и механизмов // Аппаратура автоматизации для шахт, разрезов и углеобогадательных фабрик: Сб. научн. трудов ГУА. – М.: ГУА, 1982. – с. 3-9.
18. Бородин, М.В., Виноградов А.В. Повышение эффективности функционирования систем электроснабжения посредством мониторинга качества электроэнергии: Монография // Федеральное гос. бюджетное

образовательное учреждение высш. проф. образования "Орловский гос. аграрный ун-т". - Орел: ОрелГАУ, 2014. - 159 с.

19. Борцов Ю.А., Соколовский Г.Г. Автоматизированный электропривод с упругими связями. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Энергоатомиздат. Санкт-Петербург. отд-ние, 1992г. – 288 с.

20. Борцов Ю.А., Соколовский Г.Г. Тиристорные системы электропривода с упругими связями. – Л.: Энергия, Ленингр. отд-ние, 1979. – 160 с.

21. Боярская Н.П., Довгун В.П., Егоров Д.Э., Темербаев С.А., Шевченко Е.С. Синтез фильтрокомпенсирующих устройств для систем электроснабжения. под ред. В. П. Довгуна. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2014. – 192 с.

22. Бурыгин Б.Ш., Фоттлер Ф.К. Синтез структуры управления электроприводом постоянного тока с учетом упругого звена в механической передаче // Изв. вузов. Эл-механика. 1979. №5. – с. 19-24.

23. Вагин Г.Я. К вопросу о повышении энергоэффективности промышленных предприятий // Промышленная энергетика. – 2013. – №5. – с. 2-6.

24. Вагин Г.Я., Дудников Л.В., Зенютич Е.А. и др. Экономия энергоресурсов в промышленных технологиях. Справочно-методическое пособие. Под ред. С.К. Сергеева – Н. Новгород: НГТУ, НИЦЭ, 2001. – 296 с.

25. Вагин Г.Я., Лоскутов А.Б. Экономия энергии в промышленности. – Н. Новгород: НГТУ, НИЦЭ, 2001. – 296 с.

26. Васильев Б.Ю. Автоматизированный электропривод машин и установок горного производства. Том 1. 2-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2023. — 356 с.

27. Васильев Б.Ю. Автоматизированный электропривод машин и установок горного производства. Том 2. 2-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2023. — 392 с.

28. Васильев Б.Ю. Энергетика электропривода. Учебник. – М.: СОЛОН-Пресс, 2015. – 268 с.

29. Варфоломеев Г.Н. Методы и средства преобразования числа фаз для улучшения электромагнитной совместимости в электрических системах: Дис. ... док. техн. наук: 05.09.03 / НГТУ Новосибирск:, 1998 – 250 с.
30. Волощенко Н.И. Эффективное использование электроэнергии и топлива в угольной промышленности / Н.И. Волощенко и др. Под ред. Э.П. Островского, Ю.П. Миновского.- М.: Недра, 1990. - 407 с.
31. Гамазин С. И., Пупин В. М., Марков Ю. В. Обеспечение надежности электроснабжения и качества электроэнергии. Промышленная энергетика №11. 2006. с. 28-35.
32. Герасимьяк Р.П. Повышение качества многомассовых электромеханических систем подъемных механизмов с регулируемым электроприводом // Труды III Международ. (XIV Всерос.) науч.-техн. конф. «АЭП-2001» 12-14 сент. 2001г. – Н.Новгород, 2001. – с. 58-59.
33. Герман-Галкин С.Г. Виртуальная лаборатория полупроводниковых систем в среде Matlab-Simulink. – СПб.: Издательство «Лань», 2013 – 448 с.
34. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: Учебное пособие. – СПб.: КОРОНА принт, 2001. – 320 с.
35. Глушко В.В. Характеристики режимов работы горных машин и их автоматическое управление. – М.: Недра, 1983. – 240 с.
36. Гордеев В.И., Васильев И.Е., Щуцкий В.И. Управление электропотреблением и его прогнозирование. – Ростов-на-Дону: Изд. РГУ, 1991. – 104 с.
37. ГОСТ 32144–2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
38. ГОСТ 30804.4.30-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии.

39. Гостев В.И. Системы управления с цифровыми регуляторами: Справочник. – Киев, «Техника», 1990г. – 280 с.
40. Государственная программа РФ «Развитие угольной промышленности до 2030 г.». – М., 2014.
41. Государственная программа РФ «Энергосбережение и повышение энергоэффективности на период 2030 г.». – М.: Минэнерго РФ, 2010.
42. Государственная программа РФ «Энергоэффективность и развитие энергетики». – М., 2014
43. Гофман В.М., Миновский Ю.П. Регулирование электропотребления и экономия электроэнергии на угольных шахтах. – М.: Недра, 1988. – 190 с.
44. Грин А.В. Фильтро-компенсирующие устройства для обеспечения электромагнитной совместимости в электротехнических комплексах с вентильной нагрузкой: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 СПб, 1998. 177 с.
45. Гришко А.П. Стационарные машины. – Том 1. Рудничные подъемные установки: Учебник для вузов. – М.: Издательство МГГУ, 2006, - 477 с.
46. Гришко А.П., Шелоганов В.И., Стационарные машины и установки: Учебное пособие для вузов. – М.: Издательство МГГУ, 2004, - 328 с.
47. Гуляев Е.Н. Электромагнитная совместимость полупроводниковых преобразователей с сетью и нагрузкой: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 – Уфа, 2010. 175 с.
48. Гуляев И.В. Обобщенная электромеханическая система на основе асинхронизированного вентильного двигателя. - Саранск: изд-во Мордов: Ун-та, 2004. 84с.
49. Гуляев И.В., Тутаев Г.М. Моделирование электромеханических процессов обобщенной электромеханической системы на основе асинхронизированного вентильного двигателя. — Саранск: изд-во Мордов. Ун-та; 2004. 108с.
50. Дзюбан В.С., Риман Я.С, Маслий А.К. Справочник энергетика угольной шахты. М.: Недра, 1983. - 542 с

51. Дмитриев Б.Ф. Автономные системы электропитания с многоуровневыми выпрямителями и широтно-импульсным регулированием: дис. ... докт. техн. наук: 05.09.03 СПб., 2002. - 422 с.
52. Дмитриев Б.Ф., Галушин С.Я. Топологии корректоров коэффициента мощности в автономных системах электропитания. Морской вестник. 2013. № 1S (10). С. 37-40.
53. Дмитриев Б.Ф., Тун П.П. Математическое описание электромагнитных процессов в многоуровневых преобразователях для автономных систем электропитания. Морской вестник. 2013. № 1S (10). С. 40-45.
54. Добрусин Л.А. Основы теории и проектирования оптимальных фильтрокомпенсирующих устройств для преобразователей: дис. ... докт. техн. наук: 05.09.03 – М.:, 1998. 351 с.
55. Добрусин Л.А. Широкополосные фильтрокомпенсирующие устройства для тиристорных преобразователей. Электричество. 1985. № 4. - с. 4-18.
56. Добрусин Л.А., Павлюют А.Г. Влияние конденсаторов в составе фильтрокомпенсирующих устройств на несинусоидальность напряжения сети. Электричество. 1975. № 12.-с. 14-18.
57. Добуш В.С. Компенсация высших гармоник с учетом фазовых соотношений в электротехническом комплексе промышленных предприятий: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 – СПб., 2013. 125 с.
58. Егоров Д.А. Совершенствование методов расчета многофункциональных фильтрокомпенсирующих устройств для сетей 10 - 0,4 кВ дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 Красноярск, 2015. - 333 с.
59. Ершов М.С., Анцифоров В.А., Комков А.Н. Оценка взаимной зависимости источников питания систем промышленного электроснабжения с учетом несимметричных возмущений во внешних электрических сетях. Промышленная энергетика. 2014. №11. С. 2–7.
60. Ершов М.С., Егоров А.В., Комков А.Н. Влияние частоты на устойчивость промышленных электротехнических систем. Промышленная энергетика. 2013. №9. С.21–25.

61. Ершов М.С., Конкин Р.Н. Методика экспериментального определения параметров источников питания промышленных систем электроснабжения. Промышленная энергетика. 2017. № 2. С. 34–39.
62. Ершов М.С., Чернев М.Ю. Определение и оценка показателей эмиссии гармонических составляющих токов от низковольтных асинхронных частотно-регулируемых приводов // Известия ВУЗов. Электромеханика 2019 т.62 №1 с. 59 – 65.
63. Ефимов А.А. Активные преобразователи в регулируемых электроприводах переменного тока: Теория, математическое моделирование, управление: дис. ... докт. техн. наук: 05.09.03 СПб., 2002. - 426 с.
64. Ефимов А.А. Управление активными преобразователями тока. В сборнике: Завалишинские чтения 14. 2014. С. 61-67.
65. Ефимов А.А., Косулин В.Д., Мельников С.Ю. Прогнозирующее релейно-векторное управление активными токовыми преобразователями. Информационно-управляющие системы. 2014. № 4 (71). С. 48-53.
66. Ефимов А.А., Мухаматшин И.А. Управление активными преобразователями в системах электроснабжения и электропривода. Известия Российской академии наук. Энергетика. 2005. № 4. С. 91-112.
67. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий// - М: Энергоатомиздат, 1994. - 272 с.
68. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в установках поперечно-емкостной компенсации в промышленных сетях Электричество. -1973. - №11. - с. 40-46.
69. Жежеленко И.В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях/ - М: Энергоатомиздат, 1986.- 168 с.
70. Жежеленко И.В., Рабинович М.Л., Божко В.Н. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях - Киев: Техника, 1981.-160 с.
71. Жежеленко И.В., Рабинович М.Л., Божко В.Н., Вагин Г.Я. Эффективные режимы работы электротехнологических установок - Киев.: Техника, 1987. - 183 с.
72. Жежеленко И.В., Шиманский О.Б. Электромагнитные помехи в системах промышленных предприятий Киев: Вища школа, 1986. - 120 с.

73. Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии. - М.: ЭНАС, 2009. - 456с.
74. Железко Ю.С. Стандартизация параметров электромагнитной совместимости в международной и отечественной практике. Электричество. - 1996.-№ 1.-с. 2-7
75. Железко Ю.С. Стратегия снижения потерь и повышения качества электроэнергии в электрических сетях. Электричество. 1992. № 5. - с. 6-12.
76. Железко Ю.С. Требования к отклонениям напряжения в точках присоединения потребителей к электрическим сетям общего назначения. Промышленная энергетика. 2001. №10. с 52-57.
77. Зарипов Ш.У. Оценка показателей качества напряжения в условиях Навоийского гидрометаллургического завода // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2011. - Специальный выпуск №3. С. 10-13.
78. Захарова А.Г. Закономерности электропотребления на угольных шахтах Кузбасса: монография; Гос. учреждение Кузбас. гос. техн. ун-т. - Кемерово, 2002. -198 с.
79. Захарова А.Г. Закономерности электропотребления на угольных шахтах Кузбасса : диссертация ... доктора технических наук : 05.09.03 / Кузбас. гос. техн. ун-т. - Кемерово, 2006. - 328 с.
80. Захарова А.Г., Разгильдеев Г.И. Структура энергопотребления и ресурсы энергосбережения на шахтах Кузбасса. Уголь. 2000. № 7 (892). С. 48-50.
81. Зацепин Е.П., Ладанов А.С., Захаров К.Д. Влияние качества электроэнергии на показания счетчиков. Промышленная энергетика. 2004. №5 с. 40- 44.
82. Зимин Е.Н., Кацевич В.Л., Козырев С.К. Электроприводы постоянного тока с вентильными преобразователями. – М.:Энергоиздат, 1981г. – 192 с.
83. Зыкин Ф.А. Определение степени участия нагрузок в снижении качества электроэнергии// Электричество. -1992. -№11.- С. 13 - 19.

84. Ивакин В.Н., Худяков В.В. Синтез фильтров высших гармоник для промышленных предприятий и энергосистем. Электротехника. 1997. №3.- с.40-44.
85. Иванов В.С., Соколов В.И. Режимы потребления и качество электрической энергии систем электроснабжения промышленных предприятий. - М.: Энергоатомиздат, 1987.-336с.
86. Иванов И.В. Исследование и разработка регулятора сетевого фильтра высших гармоник для сетей автономного электроснабжения.//Диссертация кандидата технических наук: 05.09.06. - М., 1993. - 146 с.
87. Ильинский Н.Ф. Электроприводы постоянного тока с управляемым моментом. М.: Изд. Энергоиздат, 1981 - 144с.: ил.
88. Ильинский. Н.Ф. Энергосберегающий электропривод // Энергия. 1999. № 2. - 24 с.
89. Каплунов Д.Р. Развитие производственной мощности подземных рудников при техническом перевооружении. – М.: Издательство Наука, 1989, - 263 с.
90. Каплунов Д.Р., Калмыков В.Н., Рыльникова М.В. Комбинированная геотехнология. – М.: Руда и металлы, 2003. 560 с.
91. Карташев И.И., Тульский В.Н., Шамонов Р.Г. и др. Управление качеством электроэнергии. -М.: Изд-во. МЭИ, 2006. — 320 с.
92. Католиков В.Е., Динкель АД., Седунин А.М. Тиристорный электропривод с реверсом возбуждения двигателя рудничного подъема. – М.: Энергия 1990 – 382 с.
93. Клишин В.И., Писаренко М.В. Научное обеспечение инновационного развития угольной отрасли. // Уголь. 2014. № 9 (1062). С. 42-46.
94. Ключев В.И. Теория электропривода: Учеб. для вузов. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.
95. Ключев В.И., Жильцов Л.В., Калашников Ю.Т. Состояние и перспективы развития теории электропривода с упругими механическими связями // Электричество. 1981. №7. - с. 28-32.

96. Ключев В.И., Микитченко А.Я. Разработка преобразователей для электроприводов переменного тока предприятий горнодобывающей промышленности // Тезисы докладов II Международной (XII Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу. – Ульяновск, 1998. – с. 139-140.
97. Коваль А.Н. Исследование и совершенствование кинематических характеристик клетевых подъемных установок глубоких шахт. : Дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Моск. горн. ин-т. М.:, 1986 – 181 с.
98. Козырев С.К. Тенденции развития автоматизированного электропривода // Новые технологии: Науч.-технич. информ. бюллетень МГОУ. 1999. № 2. – с. 65-70.
99. Константинов Б.А., Жежеленко И.В. Качество электрической энергии и электромагнитная совместимость электрооборудования предприятий Электричество. 1977. №3. с. 3 - 7.
100. Копылов К.Н., Кубрин С.С., Загоршменный И.М., Решетняк С.Н. Резервы повышения эффективности работы выемочных участков угольных шахт. Уголь № 3-2019 с. 46-49.
101. Копылов К.Н., Кубрин С.С., Загоршменный И.М., Решетняк С.Н. Экспериментальные исследования параметров работы очистного комбайна угольной шахты при различных скоростях подачи. Горный информационный аналитический бюллетень №12 2017. Отдельный сборник №29 г. М.: Издательство «Горная книга» с. 48 – 56.
102. Копылов К.Н., Кубрин С.С., Решетняк С.Н. Актуальность повышения уровня энергоэффективности и безопасности выемочного участка угольной шахты. Уголь 2018 № 10 с. 66 – 70.
103. Копылов К.Н., Кубрин С.С., Решетняк С.Н. Повышение уровня учета и контроля потребления электроэнергии подземными потребителями шахт и рудников. Горный информационный аналитический бюллетень №3 2017 г. М.: Издательство «Горная книга» 97 – 106 с.

104. Копылов К.Н., Кубрин С.С., Решетняк С.Н. Повышение уровня энергоэффективности и безопасности выемочного участка угольной шахты. Горный журнал №4 2019 г. с. 85-89.
105. Копылов К.Н., Плащанский Л.А., Решетняк С.Н., Решетняк М.Ю., Кубрин С.С. Актуальность повышения энергоэффективности оборудования выемочного участка угольной шахты Международная научная школа молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке – глазами молодых». –М.: ИПКОН РАН. 2016 г с. 142 - 145. ISBN 978-5-9908531-2-6
106. Копылов К.Н., Плащанский Л.А., Решетняк С.Н., Решетняк М.Ю., Кубрин С.С. Актуальность исследования параметров качества электрической энергии в подземных сетях угольных шахт Международная научная школа молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке – глазами молодых». –М.: ИПКОН РАН. 2016 г с. 129 - 134. ISBN 978-5-9908531-2-6
107. Копылов К.Н., Решетняк С.Н., Кубрин С.С. Актуальные аспекты повышения энергоэффективности оборудования выемочного участка угольной шахты. Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий: сборник научных трудов III Международной (VI Всероссийской) научно-технической конференции. Т.1: Повышение надежности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2017. с. 529-533. ISBN 978-5-7831-1470-0
108. Копылов К.Н., Решетняк С.Н., Кубрин С.С. Имитационное моделирование системы электроснабжения выемочного участка угольной шахты. Горный информационный аналитический бюллетень №12 2016 г. М.: Издательство «Горная книга» с. 40 – 50. ISSN 0236-1493
109. Копылов К.Н., Решетняк С.Н., Кубрин С.С. Инновационная структура управления выемочного участка угольной шахты. «Известия высших учебных заведений. Горный журнал №1 2017 г. с. 5 – 10.

110. Копылов К.Н., Решетняк С.Н., Кубрин С.С. Пути модернизации выемочного комбайна угольной шахты. // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2016 № 4, т. 12, с. 41 – 47.
111. Кубрин С.С. Математические модели и методы информационно-аналитических систем. М.: Энергоатомиздат, 2002. 132 с.
112. Кубрин С.С. Решетняк С.Н. Копылов К.Н. Энергоэффективное операционное управление очистным участком. «Известия высших учебных заведений. Горный журнал №5 2016 г. с. 4 – 10.
113. Кубрин С.С., Загоршменный И.М., Решетняк С.Н., Максименко Ю.М. Повышение эффективности функционирования горных машин угольных шахт Уголь. 2024;(4):83-87. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-4-83-87.
114. Кубрин С.С., Захаров В.Н. Цифровая трансформация и интеллектуализация горнотехнических систем. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2022. № 5-2. С. 31-47.
115. Кубрин С.С., Копылов К.Н., Загоршменный И.М. Вопросы оперативного управления комплексным механизированным забоем высокопроизводительных выемочных участков. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2018. № S48. С. 208 – 216.
116. Кубрин С.С., Мосиевский А.А., Загоршменный И.М., Решетняк С.Н., Максименко Ю.М. Пути повышения энергетической эффективности подземных электрических сетей высокопроизводительных угольных шахт // Уголь №2 2022 стр. 4 – 9.
117. Кубрин С.С., Решетняк С.Н. Автоматизированная информационно-измерительная система технического учета электроэнергии для подземных горных работ. ГИАБ №11 2014 г. с. 337-341.
118. Кубрин С.С., Решетняк С.Н. Имитационное моделирование режимов технологического оборудования комплексно-механизированного забоя высокопроизводительной угольной шахты в программе MATLAB.

Электротехнические и информационные комплексы и системы. №1 2021 год, стр. 120 – 128.

119. Кубрин С.С., Решетняк С.Н., Бондаренко А.М. Анализ влияния технологических факторов на удельные нормы электропотребления оборудования выемочных участков угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 2. – С. 161–170.

120. Кубрин С.С., Решетняк С.Н., Бондаренко А.М. Анализ технологических показателей работы выемочного участка шахты «Полысаевская» АО «СУЭК-Кузбасс». Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) Mining Informational and analytical bulletin (scientific and technical journal). – № 3 2019г. с.14-21.

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

122. Кузнецов А.В. Повышение эффективности функционирования устройств управления передачей электроэнергии в системах электроснабжения потребителей: диссертация ... доктора технических наук : 05.09.03. УГТУ – Ульяновск, 2004. - 395 с.

123. Курбацкий В.Г. Экономическая оценка влияния качества электроэнергии на работу электрооборудования России. Промышленная энергетика. -1990.-№4.- С. 12-16.

124. Кучумов Л.А., Спиридонов Л.В. Особенности расчета параметров фильтров высших гармонических для распределительных сетей переменного тока. Электричество. - 1974. - №1. - с. 19-26.

125. Липский А.М., Поляков Г.Н. Эксплуатационный контроль показателей качества электроэнергии в сетях действующих предприятий. - М.: МДНТП, 1983. -265 с.

126. Лобур И.А. Исследование и моделирование электропотребления на угольных шахтах Кузбасса : диссертация ... кандидата технических наук : 05.09.03. - Кемерово, 2005. - 173 с.
127. Лозовский С.Е. Управление качеством электрической энергии в электротехнических комплексах предприятий горной промышленности с применением виртуальных измерительных систем : диссертация ... кандидата технических наук : 05.09.03. - Санкт-Петербург, 2000. - 141 с.
128. Ляхомский А.В. Исследование электрических нагрузок на базе многоуровневой кластеризации // Изв. вузов. «Электромеханика». – 1989. – №5. – С. 126-128.
129. Ляхомский А.В. Математическое моделирование электропотребления горных предприятий // Изв. вузов. Электромеханика. – 1986. – №12 – с.15-17.
130. Ляхомский А.В. Развитие теории и совершенствование методов повышения эффективности применения электроэнергии на горных предприятиях: Дис. ... док. техн. наук: 05.09.03 / Моск. гос. горн. ун-т. М., 1990 – 458 с.
131. Ляхомский А.В., Решетняк С.Н., Кутепова Е.Н. Оценка влияния показателей качества электроэнергии на эффективность функционирования электротехнического комплекса угольной шахты // ГИАБ. – 2025 г. - № 6 - С. 168-180.
132. Ляхомский А.В., Перфильева Е.Н. Оценка уровня управления энергоресурсами горных предприятий // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2005. – № 7. – С. 306-308.
133. Ляхомский А.В., Плащанский Л.А., Решетняк С.Н., Решетняк М.Ю. Анализ гармонического состава напряжения в подземных электрических сетях высокопроизводительных угольных шахт // Промышленная энергетика. 2021. № 10. С. 32-41.
134. Ляхомский А.В., Плащанский Л.А., Решетняк С.Н., Решетняк М.Ю. Разработка высоковольтного устройства автоматизированного мониторинга качества электрической энергии в подземных сетях угольных шахт. Горный

информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)
Mining Informational and analytical bulletin (scientific and technical journal). – №
7 2019г. с.207-213.

135. Ляхомский А.В., Решетняк С.Н. Способы исследования коррекции координат в электроприводах подъемных установок. Электрика №4. 2009г. - с. 33 – 37.

136. Ляхомский А.В., Фащиленко В.Н. Теория и практика проведения энергетических обследований предприятий минерально-сырьевого комплекса // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2011. № 1. С. 525–529.

137. Ляхомский А.В., Фащиленко В.Н. Управление электромеханическими системами горных машин. М.: Издательство МГГУ, 2004 – 296 с.

138. Ляхомский А.В., Фащиленко В.Н., Решетняк С.Н. Демпфирование колебаний в электроприводах подъемных установок с целью повышения их эксплуатационных свойств. Приводная техника №6.– с 27 - 32.

139. Малиновский А.К., Шелков П.И. Электропривод горных машин с высокоэкономичным тормозным режимом. ГИАБ №1 1998г. с. 77 – 78.

140. Мартынов М.В., Переслегин Н.Г. Автоматизированный электропривод в горной промышленности. Изд. 2, перераб. и доп. М.: Недра, 1977. – 375 с.

141. Матвеев В.Н. Повышение безопасности эксплуатации шахтных участковых систем электроснабжения и их компонентов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.09.03 Кемерово, 2003. 421 с.

142. Миновский Ю.П. Экономия и нормирование электроэнергии в угольной промышленности // Уголь. – 1986. – № 4. – С. 17-19.

143. Миновский Ю.П. Эффективность мероприятий по снижению потребления электроэнергии на шахтах // Уголь. – 1983. – № 5. – С. 14-15.

144. Миновский Ю.П. Эффективность электроснабжения угольных шахт. – М.: Недра, 1990. – 158 с.

145. Митькин Р.В., Решетняк С.Н. Энергоресурсосберегающий электропривод шахтной подъемной установки. Сборник: Технологический

суверенитет и цифровая трансформация. Международная научно-техническая конференция. Казань, 2024. С. 148-152.

146. Муравьев В.П., Разгильдеев Г.И. Надежность систем электроснабжения и электрооборудования подземных разработок угольных шахт. - М.: Недра, 1970.-145 с.

147. Найденко И.С., Белый В.Д., Шахтные многоканатные подъемные установки. Изд. 2, перераб. И доп. - М.: Изд. Недра, 1979, - 391с.

148. Немцев Г.А. Анализ влияния качества электроэнергии на эксплуатацию электротехнических систем промышленных предприятий: дис. ... д-ра техн. наук: 05.09.03 Москва, 1996. 415 с.

149. Никифоров Г.В., Олейников В.К., Заславец Б.И., Шеметов А.Н. Управление режимами энергопотребления промышленного предприятия с использованием современных информационных технологий // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2014. – №2. – С. 12-21.

150. Осипов Д.С., Коваленко Д.В, Долгих Н.Н. Расчет токов высших гармоник в системах электроснабжения на основе пакетного Вейвлет-преобразования // Динамика систем, механизмов и машин - 2017. Том 5 - №3 – С. 68 – 78.

151. Переслегин Н.Г. Вопросы создания электроприводов, обеспечивающих ограничение упругих деформаций в механических системах // Электротехн. пром-сть. Сер. Электропривод. – 1981. Вып. 4(84). – с. 8-11.

152. Переслегин Н.Г. Демпфирующие свойства электропривода в многомассовых системах с упругими связями / Автоматизированный электропривод/ Под общ. ред. Н.Ф. Ильинского, М.Г. Юнькова. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – с. 56-62.

153. Переслегин Н.Г. Синтез систем управления электроприводами многомассовых механизмов с упругими связями / Под общ. ред. Н.Ф. Ильинского, М.Г. Юнькова. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – с. 82-89.

154. Переслегин Н.Г., Фащиленко В.Н. Демпфирующие свойства электромеханической системы шахтных подъемных машин. – М., 1985. – Деп. в ЦНИЭИуголь, №3309.
155. Петроченков А.Б. Теория, методы и средства повышения эффективности функционирования электротехнических комплексов предприятий минерально-сырьевой отрасли. Дис. ... док. техн. наук: 05.09.03 / НИТУ МИСиС М.;, 2019 – 381 с.
156. Пивняк Г.Г. Жежеленко И.В., Папаика Ю.А. Резонансные процессы в системах электроснабжения угольных шахт с мощными нелинейными нагрузками. Электроэнергетика управление, качество и эффективность использования энергоресурсов сборник трудов седьмой всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Амурский государственный университет. 2013. С. 132-138.
157. Пивняк Г.Г., Бешта А.С., Заика В.Т., Разумный Ю.Т. Регулирование электропотребления на горнодобывающих предприятиях Украины. // Горный журнал. 2005. № 5. С. 101-102.
158. Пивняк Г.Г., Заика В.Т., Самойленко В.В. Научные и методические основы эффективного использования электроэнергии на угольных шахтах Украины // Горный журнал. 2010. № 7. С. 92-96.
159. Пичуев А.В. Обоснование методов и средств защитного отключения в подземных электрических сетях горных предприятий. дис. ... д-ра техн. наук: 2.4.2 Москва, 2024. 325 с.
160. Плащанский Л. А. Основы электроснабжения горных предприятий // Учебник для ВУЗов. – М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2005. – 499 с.
161. Плащанский Л.А., Зарипов Ш.У. Влияние высших гармоник на состояние электрических сетей Навоийского горно-металлургического комбината// Известия ВУЗов. Горный журнал.- 2010. -№2. -С. 61-66.
162. Плащанский Л.А., Ляхомский А.В., Решетняк М.Ю., Решетняк С.Н. Высоковольтное устройство автоматизированного мониторинга качества

электрической энергии в подземных сетях угольных шахт. Патент на полезную модель №185421 от 04.12.2018г.

163. Плащанский Л.А., Решетняк М.Ю. Актуальность оценки показателей качества электроэнергии в подземных электрических сетях угольных шахт. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – № 48 (специальный выпуск). М.: Издательство «Горная книга» 2018 г. с.313-321.

164. Плащанский Л.А., Решетняк М.Ю. Актуальные аспекты исследования показателей качества электрической энергии в подземных сетях высокопроизводительных угольных шахт. Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий: сборник научных трудов III Международной (VI Всероссийской) научно-технической конференции – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2017. с. 520 – 525.

165. Плащанский Л.А., Решетняк М.Ю. Анализ гармонического состава в электрических сетях понизительных подстанций угольных шахт. Горный журнал №5 2020г. с. 63 – 67.

166. Плащанский Л.А., Решетняк М.Ю. Анализ электромеханических систем выемочных комбайнов угольных шахт высокой производительности. "Энергобезопасность и энергосбережение" №3 2019 г. с. 17-21.

167. Плащанский Л.А., Решетняк М.Ю. Особенности функционирования электромеханических систем выемочных комбайнов угольных шахт. Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий: сборник научных трудов IV Международной научно-технической конференции. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2019. 44-50 с.

168. Плащанский Л.А., Решетняк М.Ю. Устройство автоматизированного мониторинга качества электрической энергии в подземных сетях угольных шахт. Вопросы электротехнологии. 2019. № 4 (25). С. 74-80.

169. Плащанский Л.А., Решетняк С.Н., Решетняк М.Ю. Исследование резонансных явлений в подземных электрических сетях

высокопроизводительных угольных шахт. Вести высших учебных заведений Черноземья. 2021. № 2 (64). С. 13-25.

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

171. Плащанский Л.А., Решетняк С.Н., Решетняк М.Ю. Особенности функционирования выемочных участков угольных шахт высокой производительности. Горный информационный аналитический бюллетень №12 2017. Отдельный сборник №29 г. -М.: Издательство «Горная книга» с. 19 – 25.

172. Плащанский Л.А., Решетняк С.Н., Решетняк М.Ю. Повышение качества электрической энергии в подземных электрических сетях высокопроизводительных угольных шахт // Горные науки и технологии. 2022;7(1):66-77. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-1-66-77>.

173. Плехов А.С., Титов Д.Ю., Шевырев Ю.В., Шевырева Н.Ю. Управление качеством электроэнергии слабых сетей посредством активного выпрямителя напряжения // Интеллектуальная электротехника 2018 №1 с. 101 – 111.

174. Праховник А.В., Розен В.П., Дегтярев В.В. Энергосберегающие режимы электроснабжения горнодобывающих предприятий. – М., Недра, 1985. – 232 с.

175. Пронин М.В. Создание систем с электрическими машинами и полупроводниковыми преобразователями на основе комплекса быстродействующих уточненных моделей. Дис. ... док. техн. наук: 05.09.03 / Санкт. Петербург. гос. горн. ун-т. СПб., 2006. – 290 с.

176. Пронин М.В. Активные фильтры высших гармоник. Направления развития. Новости электротехники. 2006. № 2. С. 102.

177. Пронин М.В., Воронцов А.Г. Активная фильтрация напряжений и токов сети в установках с высоковольтными тиристорными преобразователями. Горное оборудование и электромеханика. 2005. № 5. С. 41- 45.

178. Пугачев Е.В., Фрянов В.Н. Проблемы развития угольной промышленности Кузбасса // Уголь. 1999. № 4. С. 33.
179. Пучков Л.А., Пивняк Г.Г. Электрификация горного производства. Учебник для вузов. –М: Издательство Московского государственного горного университета, 2007. – Т. 2. – 595 с.
180. РД 153-34.0-15.501-00 «Методические указания по контролю и анализу качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».
181. Решетняк М.Ю. Исследование гармонического состава в электрических сетях поверхностного комплекса высокопроизводительных угольных шахт. Электротехнические и информационные системы и комплексы №4 2019 с. 61-67.
182. Решетняк М.Ю. Повышение качества электрической энергии в подземных электрических сетях высокопроизводительных угольных шахт. Дис. ... канд. техн. наук: 2.4.2 / НИТУ МИСИС М., 2022 – 150 с.
183. Решетняк С.Н. Актуальность повышения уровня энергоэффективности и безопасности очистного участка угольной шахты. 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.
184. Решетняк С.Н., Митькин Р.В. Современное состояние и перспективы развития рудничных подъемных установок // Энергобезопасность и энергосбережение - 2025г. - №2 - С. 56 – 60.
185. Решетняк С.Н. Анализ методов построения прогнозных моделей электропотребления в условиях высокопроизводительных угольных шахт. Электротехнические и информационные комплексы и системы. №2 2020 год. стр. 28 – 35. DOI: 10.17122/1999-5458-2020-16-2-28-34
186. Решетняк С.Н., Перфильева Е.Н. Обоснование обобщенной модели электротехнической системы для исследования влияния высших гармоник в

условиях технологического оборудования угольных шахт. Энергобезопасность и энергосбережение - 2025г. -. №1 - С. 22-26.

187. Решетняк С.Н. Методология исследования режимов генерирования высших гармонических составляющих преобразовательными устройствами в системах электропривода технологического оборудования угольных шахт. Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления - 2025г. -. №1 - С. 5-21.

188. Решетняк С.Н., Зотов В.В., Сучко Д.С., Мустафаев С.В. Декомпозиционный анализ системы электроснабжения угольных шахт для оценки генерирования высших гармоник технологическим оборудованием поверхностного комплекса. Уголь. 2025;(1):93-99.

189. Решетняк С.Н. Техничко-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. – № 1(28). – С. 4-20.

190. Решетняк С.Н. К вопросу анализа систем электропривода подъемных установок при параллельной коррекции координат. Сборник научных статей «Электрификация и энергоэффективность» отдельный выпуск №4 ГИАБ 2011 год. М.: Издательство «Горная книга» 2011 г. – с.156-167.

191. Решетняк С.Н. К вопросу о применении частотно-регулируемого привода шахтных подъемных установок. ГИАБ №5 2005г. М.: Издательство МГГУ -с. 230-233.

192. Решетняк С.Н. К вопросу повышения энергетических показателей промышленных предприятий // Приволжский научный вестник. 2013. № 10. С. 41–44.

193. Решетняк С.Н. К вопросу повышения энергетической эффективности при отработке высокопроизводительных забоев метанообильных угольных шахт. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) Mining Informational and analytical bulletin (scientific and

technical journal). – № 48 (специальный выпуск) Том 1.. М.: Издательство «Горная книга» 2018 г. с.355-364.

194. Решетняк С.Н. Математическое моделирование трехмассовой ЭМС подъемной установки при параллельной коррекции координат. ГИАБ №2 2009г. М.: Издательство МГГУ –с. 300-304.

195. Решетняк С.Н. Математическое описание трехмассовой ЭМС подъемной установки. ГИАБ №7 2007г. М.: Издательство МГГУ -с. 287-292.

196. Решетняк С.Н. Обоснование и выбор структур системы управления электроприводом шахтной подъемной установки. Дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Московский государственный горный университет М.:, 2010 – 154 с.

197. Решетняк С.Н. Обоснование и выбор структур системы управления электроприводом шахтной подъемной установки. ГИАБ №10 2010г. М.: Издательство МГГУ –с. 367-368.

198. Решетняк С.Н. Повышение эффективности функционирования поверхностного комплекса угольных шахт // Энергобезопасность и энергосбережение - 2024г. -. №2 - С. 59-65.

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

200. Решетняк С.Н., Ляхомский А.В. Способы исследования коррекции координат в электроприводах подъемных установок. Электрика №4. 2009г. - с. 33 – 37.

201. Решетняк С.Н., Решетняк М.Ю. Актуальные аспекты повышения уровня энергоэффективности высокопроизводительных угольных шахт. Энергобезопасность и энергосбережение. №3 2017г. стр. 21-24.

202. Решетняк, С.Н. К вопросу обоснования критериев рационализации систем электроснабжения угольных шахт. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии / С.Н. Решетняк // - 2025г. – 1 (369) – С. 135 – 140.

203. Решетняк С.Н., Фащиленко В.Н., Федоров О.В. Особенности применения нелинейной техники на горнодобывающих предприятиях России. ГИАБ №6 2008г. М.: Издательство МГГУ -с. 331-335.
204. Розанов Ю.К., Бурман А.П., Шакарян Ю.Г. Управление потоками электроэнергии и повышение эффективности электроэнергетических систем. Издательский дом «МЭИ». -М.: 2012. 336 с.
205. Рубан А.Д., Артемьев В.Б., Забурдяев В.С., Забурдяев Г.С. Руденко Ю.Ф. Проблемы обеспечения высокой производительности очистных забоев в метанообильных шахтах. – М.: Издательство ООО «Московский издательский дом», 2009г. – 396 с.
206. Рылов Ю.А. Расчет режимов работы систем электроснабжения и определение долевого вклада потребителей в показатели качества электроэнергии при наличии несинусоидальных нагрузок: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 – Казань, 2006. 152 с.
207. Сальников И.Я. Разработка систем электропривода «ПЧ – АД) подъемных установок. : Дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 /Пермский. Политех. ин-т. Пермь:, 1987 - 191с.
208. Самаров Е.К. Исследование и разработка многоканального анализатора качества электроэнергии повышенной точности: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 – Черкизово, 2006. 141 с.
209. Сериков В.А. Повышение качества электроэнергии активными фильтрокомпенсирующими в промышленных электротехнических комплексах с нелинейной нагрузкой и конденсаторными установками при резонансных режимах: дис. ... канд. техн. наук: 2.4.2 – СПб., 2023. 177 с.
210. Скамьин А.Н. Обоснование структуры и параметров системы компенсации реактивной мощности при наличии высших гармоник в напряжении и токе: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 – СПб., 2011. 125 с.
211. Скурятин Ю.В., Белоусов А.В., Денисевич Н.А. Параллельный силовой активный фильтр с управлением на скользящих режимах // Проблемы региональной энергетики. 2018. № 2 (37). С. 20-30.

212. Смирнова В.И., Разинцев В.И. Проектирование и расчет автоматизированных приводов. –М.: Машиностроение, 1990. – 368 с.
213. Степанов С.В. Повышение эффективности локальных систем электроснабжения: Дис. ... док. техн. наук: 05.09.03 / Саратовский государственный технический университет. Саратов., 2006 – 362 с.
214. Сычев Ю.А. Фильтрокомпенсирующие устройства с активными преобразователями для повышения качества электроэнергии в электротехнических комплексах нефтегазовых предприятий. Дис. ... док. техн. наук: 05.09.03 / НИТУ МИСиС М.:, 2021 – 365 с.
215. Сычев Ю.А., Абрамович Б.Н., Полищук В.В. Технологии повышения качества электрической энергии как основной фактор обеспечения энергетической безопасности предприятий минерально-сырьевого комплекса // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2019;4/7:184–193
216. Справочник по электроустановкам угольных предприятий «Электроустановки угольных шахт» под общей редакцией В.В. Дегтярева, В.И. Серова, Г.Ю. Цеплинского – М.: Недра, 1988. -727 с.
217. Трофимов Г.Г. Качество электроэнергии и его влияние на работу промышленных предприятий Алма-Ата: Изд-во КазНИИНТИ, 1986. - 216 с.
218. Тулин В.С., Краус Э.Г., Брейдо И.В. Снижение потребления электроэнергии в электроприводах горных подъемных машин / Электропривод 1984 №3 – М. Информэлектро — с. 18-20.
219. Фащиленко В.Н. Структурный анализ и синтез рационального управления электромеханическими системами горных машин: Дис. ... док. техн. наук: 05.09.03 / Моск. гос. горн. ун-т. М., 2004. – 512 с.
220. Фащиленко В.Н., Решетняк С.Н. Анализ демпфирующих свойств электропривода подъемной установки с различными способами коррекции координат. Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. №1 2009г. – с.130-135.
221. Фащиленко В.Н., Решетняк С.Н. Исследование работы электропривода горных машин в энергоэффективных режимах. Сборник научных статей III

- Международного конгресса «Энергетическая безопасность». Юго-Западный государственный университет (Курск). 2020, с. 133-139.
222. Фащиленко В.Н., Решетняк С.Н. Исследование резонансного режима работы электропривода горных машин. Горный журнал №7 2017 г. с. 80-83. DOI: 10.17580/gzh.2017.07.15
223. Фащиленко В.Н., Решетняк С.Н. Мониторинг энергоэффективных режимов оборудования при подземных горных работах Автоматизированный электропривод и автоматика: сборник докладов Всероссийской научно-практической конференции. 1-4 июля 2014 г.– Липецк: Изд-во Липецкого государственного технического университета, 2014. – 26-28 с.
224. Фащиленко В.Н., Решетняк С.Н. Мониторинг энергоэффективных режимов работы электромеханических систем подземных горных машин. Электрика. 2014. № 10. С. 25-28.
225. Федеральный закон "Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации" от 23.11.2009 N 261-ФЗ.
226. Хабигер Э. Электромагнитная совместимость. Основы ее обеспечения в технике - М.: Энергоатомиздат, 1995. - 304 с.
227. Чивенков А.И. Развитие методов и средств регулирования напряжения и мощности в системах электроснабжения с автономными источниками энергии. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Нижегород. гос. техн. ун-т им Р.Е. Алексеева. Нижний Новгород, 2015. 308 с.
228. Чивенков А.И., Крахмалин И.Г. Универсальный преобразователь как основа для согласования параметров источников распределенной сети с ввэ. Интеллектуальная электротехника. 2018. № 1. С. 112-125.
229. Чивенков А.И., Севастьянов В.В., Трофимов И.М., Вихорев Н.Н., Гедифа А. Соотношение параметров входных цепей $urfc$. Инженерный вестник Дона. 2016. № 4 (43). С. 46.
230. Чивенков А.И., Соснина Е.Н., Липужин И.А. Исследование универсального преобразователя напряжений для подключения энергоустановок в дэс. Инженерный вестник Дона. 2017. № 3 (46). С. 75.

231. Чудогашев Е.В., Корняков М.В. MATLAB – 5 для моделирования электромеханических систем горных машин и установок: Учебное пособие. – Иркутск, изд-во Иркутск. гос. технич. ун-та, 2002. – 30 с.
232. Шайдуров А.С. Развитие теории системного анализа и построения оптимальных систем электроснабжения горных предприятий: дис. ... д-ра техн. наук: 05.09.03 Москва, 1993. 534 с.
233. Шакарян Ю.Г. Асинхронизированные машины и технология управляемых электропередач переменного тока (FACTS). Электротехника. 2010. № 2. С. 1-4.
234. Шакарян Ю.Г., Новиков Н.Л. Технологическая платформа Smart Grid (основные средства). Энергоэксперт. 2009. № 4. С. 42.
235. Шакарян Ю.Г., Новиков Н.Л., Новиков А.Н. Современные технологии для повышения энергоэффективности российской электроэнергетики. Энергетическая политика. 2015. № 4. С. 37-45.
236. Шевченко В.В., Хевсуриани И.М., Буре А.Б. Подавление высших гармоник в трехфазных сетях переменного тока. Промышленная энергетика. 1996. №9,- с 19-23
237. Шевырев Ю.В. Обоснование и повышение энергетических показателей регулируемых электроприводов буровых установок: дис. ... д-ра техн. наук: 05.09.03 М., 2005. 333 с.
238. Шевырев Ю.В. Улучшение качества электроэнергии при работе полупроводникового преобразователя частоты ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /МИАВ. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2020;(2):171-178
239. Шевырев Ю.В. Теория планирования эксперимента при выборе и проектировании фильтрокомпенсирующих устройств // Технический оппонент (научно-технический журнал) 2019 №3 с. 45 – 51.
240. Шевырев Ю.В., Шевырева Н.Ю., Плехов А.С., Титов Д.Ю. Применение компьютерных моделей для выбора регуляторов качества электроэнергии при

- работе электроприводов с полупроводниковыми преобразователями: Монография. Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева, 2018. – 180 с.
241. Шевырев Ю.В., Пичуев А.В., Шевырева Н.Ю. Снижение негативного влияния на питающую сеть электроприводов с полупроводниковыми преобразователями // Технический оппонент. 2019. № 2 (3). С. 38-45.
242. Шидловский А.К., Кузнецов В.Г. Повышение качества энергии в электрических сетях. – Киев. Наукова Думка. 1985. 270 с.
243. Шклярский Я.Э. Методы и средства повышения эффективности управления потоками реактивной мощности электротехнических комплексов горнодобывающих предприятий. дис. ... д-ра техн. наук: 05.09.03 СПб., 2004. 333 с.
244. Шпиганович Н.А., Никитин А.М. Один из методов оценки высших гармонических составляющих в электрических цепях. Тезисы докладов федеральной научно-технической конференции "Электроснабжение, энергосбережение и электроремонт". МЭИ и РХТУ им. Д.И. Менделеева. - М.: Энергия, 2000. -170с.
245. Шрейнер Р.Т., Ефимов А.А., Мухаматшин И.А. Релейное управление активными токовыми преобразователями частоты. Электротехника. 2005. № 9. С. 47-53.
246. Щуцкий В.И., Волощенко Н.И., Плащанский Л.А. Электрификация подземных горных работ: Учебник для вузов – М.: Недра, 1986. – 364 с.
247. Электропривод и системы управления: Тр. МЭИ / Под ред. С.К. Козырева. М.: Издательство МЭИ, 2000. № 676. - 116с.
248. Янченко С.А., Рыжкова Е.Н., Цырук С.А. Программный инструмент анализа случайных уровней показателей качества электроэнергии бытовых электросетей. Промышленная энергетика. 2023. № 5. С. 46-54.
249. Ясученя С.В., Копылов К.Н., Артемьев В.Б., Демура В.Н., Мутыгулин А.В. Очистные комбайны. – М.: Издательство «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2014г. – 576 с.

250. Abramovich B.N., Sychev Yu.A., Prokhorova V.B. The application of modern information technologies for power monitoring and control in conditions of distributed generation. В сборнике: Conference of Open Innovation Association, FRUCT 16. «Proceedings of the 16-th Conference of Open Innovations Association, FRUCT 2014» 2014. pp. 3–8.
251. Allan R.N., Blanton R.L. Bibliography on The Application of Probability Methods in Rower system Reliability evaluation. — IEEE. Vol.103.1984 pp. 275-282.
252. Fashilenko V.N., Reshetnyak S.N. Energy efficient resonant mode of electromechanical system mining machines based on management structures with PID-controller. Miner's week – 2015 Reports of the XXIII international scientific. 2015. p. 608 – 612.
253. Fashilenko V.N., Reshetnyak S.N. Improving the energy performance of industrial enterprises. Miner's week-2015 // Reports of the XXIII International scientific symposium. 2015. pp. 570–573.
254. Feng-Ke Dou, Yong-Shang Kang, Shao-Feng Qin, De-Lei Mao, Jun Han The coalbed methane production potential method for optimization of wells location selection Journal of Coal Science and Engineering (China) June 2013, Volume 19, Issue 2, pp 210–218.
255. Hebin D. Pool prices contracts and regulation in the British electricity supply industry. 1992. № 3.pp. 89-105.
256. Jalali A., Aldeen M. Improving voltage stability margin using STATCOM storage devices, in Proc. of the 2016 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe), Oct.2016, pp. 1–6.
257. Kubrin S.S. Monitoring of Coal and Rock Mass Conditions, Coal Mine Air and Extraction Equipment State // Proceedings of the 8th International Conference on Physical Problems of Rock Destruction. Metallurgical Industry Press. China 2014. pp. 454–460.
258. Kubrin S.S., Reshetnyak S.N., Bondarenko A.M. Analysis of methods of rationing of electricity consumption in coal mines. Горный информационный

аналитический бюллетень №12 2017. Отдельный сборник №29 г. М.: Издательство «Горная книга» Горный информационный аналитический бюллетень №12 2017. Отдельный сборник №29 г. М.: Издательство «Горная книга» с. 3 – 8. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-29-3-8

259. Litran S.P., Salmeron P., Prieto J. Alejandro Perez, «Control strategy for an interface to improve the power quality at the connection of AC microgrids», in Proc. of the International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'14) Cordoba (Spain), vol.12, Apr. 2014, pp. 27–33.

260. Lyakhomskii A.V., Perfil'eva E.N., Petrochenkov A.B. Conceptual design and engineering strategies to increase energy efficiency at enterprises // Russian Electrical Engineering. 2015. Vol. 86. No. 6. pp. 305–308.

261. Meshcheryakov V.N., Khabibullin M.M., Pikalov V.V., Valtchev S. Active Power Filter with Common DC Link for Compensation of Harmonic Distortion in Power Grids» In Proc. of 16-th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition (PEMC 2014), 2014, Antalya, pp. 1586–1590.

262. Ning Wang, Zongguo Wena, Mingqi Liu, Jie Guo Constructing an energy efficiency benchmarking system for coal production. Applied Energy 169. 2016 pp. 301–308.

263. Petrochenkov A.B. An information of industrial electrotechnical complexes. Russian Electrical Engineering. 2015. Vol. 86. No. 6. pp. 692–696.

264. Pichuev, A.V. Equivalent circuit for mine power distribution systems for the analysis of insulation leakage current / A.V. Pichuev, V.L. Petrov // Mining Science and Technology (Russia). 2023; 8(1):78–86. [https:// doi.org/10.17073/2500-0632-2023-01-72](https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-01-72).

265. Pivnyak G.G., Zhezhelenko I.V., Papaika Yr.A. Estimating economic equivalent of reactive power in the systems of enterprise electric power supply. Науковий Вісник Національного Гірничого університету. 2016. № 5. pp. 62-75.

266. Plashchansky L.A. Reshetnyak M.Yu. Topical aspects of assessing the quality of electricity in underground coal mine networks. Materials of the International

Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration”
Beijing, China 2019 Part 2. pp.97 – 102.

267. Reshetnyak S., Bondarenko A. Analysis of technological performance of the extraction area of the coal mine. III-rd International innovative mining symposium, IIMS 2018 Kemerovo. DOI: 10.1051/e3sconf/20184101014

268. Reshetnyak S.N. The energy-efficient controlled resonance mode for electromechanical systems. Энергобезопасность и энергосбережение. №3 2018г. стр. 27-29. ISSN 2071-2219

269. Reshetnyak S., Zotov V., Kuziev D., Kozlova O. Enhancing performance efficiency of electric consumers within surface infrastructure of coal mines // Eurasian mining 2025 (1) pp. 100-104.

270. Semenov A.S., Kuznetsov N.M. An analysis of the results of monitoring the quality of electric power in an underground mine // Measurement Techniques. – 2014 pp. 343-347.

271. Shevyrev Yu. V., N. Yu. Shevyreva, G. I. Bobokin The use of frequency converter and active rectifier of voltage for the power quality improvement in coal longwalls // Eurasian Mining. – 2022. – No. 1. – P. 80-84. – DOI 10.17580/em.2022.01.17. – EDN HUEVRM.

272. Shpiganovich A.N., Zatsepina V.I., Shpiganovich A.A., Stepanov V.M. Power-supply systems reliability control. Austrian Journal of Political Science. 2018. T. 18. № 19. С. e10.

273. Sumper A., Bagini A. Electrical energy efficiency: technologies and applications, Wiley, New York, 2012, pp. 31 – 37.

274. Xu X. «Novel current-tracking control for hybrid active power filter with injection circuit and its engineering application», in Proc. of the 2016 IEEE International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE), Oct. 2016, pp. 269 – 274.

275. Yazdani-Chamzini Abdolreza, Haji Yakhchali Siamak A new model to predict roadheader performance using rock mass properties. Journal of Coal Science and Engineering (China) March 2013, Volume 19, Issue 1, pp 51–56.

276. Zatsepina V., Zatsepin E., Shachnev O., Shachnev A., Petrov T. Analysis of power quality in presence of frequency distortions. E3S Web of Conferences. 2020. C. 178.

277. Zatsepina V.I., Zatsepin E.P., Krivonosov A.V., Lovchiy V.R. Analysis of power supply systems' reliability of according to the time-to-failure distribution functions: Proceedings - 2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2019. 2019. C. 664-668.

Перечень сокращений

- АБК – административно-бытовой комбинат
- АД – асинхронный двигатель
- АД КЗ- асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором
- АД ФР - асинхронный двигатель с фазным ротором
- АИН – автономный инвертор напряжения
- АОШ – аппарат осветительный шахтный
- АФВГ - активный фильтр высших гармоник
- ВГС – высшие гармонические составляющие
- ВЛ – воздушная линия
- ВМП – вентилятор местного проветривания
- ВУ - выемочный участок
- ГВУ - главная вентиляционная установка
- ГПП – главная понизительная подстанция
- ДПТ – двигатель постоянного тока
- И – источник напряжения
- КЛ – кабельная линия
- КПД – коэффициент полезного действия
- КРУ – комплектное распределительное устройство
- КРУВ - комплектное распределительное устройство взрывозащищенное
- КФКУ – комбинированное фильтрокомпенсирующее устройство
- ЛН – линейная нагрузка
- ЛЭП – линия электропередачи
- М – мотор
- НН – нелинейная нагрузка
- ЭОД – электропотребители околоствольного двора
- НЭПК - низковольтные электропотребителей поверхностного комплекса
- ОВ – обмотка возбуждения двигателя постоянного тока
- ПКЭ – показатели качества электрической энергии

ПП – полупроводниковый преобразователь
ПС – понизительная подстанция
ПУ - проходческий участок
ПФ – пассивный фильтр
ПФКУ – пассивное фильтрокомпенсирующее устройство
ПЧ – преобразователь частоты
РМЦ – ремонтно-механический цех
СД – синхронный двигатель
СУ – симметрирующее устройство
СУЭК – Сибирская угольная энергетическая компания
СЭС – система электроснабжения
ТП – трансформаторная подстанция
УВ – управляемый выпрямитель
УКТ - участок конвейерного транспорта
ФКУ – фильтрокомпенсирующее устройство
ЦПП – центральная подземная подстанция
ЧРП – частотно-регулируемый привод
ШИМ – широтно-импульсная модуляция
ШПУ – шахтная подъемная установка
ЭМ – электрическая машина
ЭМС – электромеханическая система
ЭП – электроприемник
ЭТК – электротехнический комплекс
ЭТС – электротехническая система

Приложения

**Приложение 1. Данные экспериментальных исследований показателей качества электроэнергии на шинах 6 кВ
главных понизительных подстанций угольных шахт**

Таблица П.1.2 - Экспериментальные значения по значению n-й гармонической составляющей напряжения в электрических сетях поверхностного комплекса угольных шахт

Номер гармоники	Допустимые значения, 6 кВ, HD(U), %	ПС-12 «ш. Полысаевская» (1 секция 6 кВ)	ПС-38 «ш. им. А.Д. Рубана» (1 секция 6 кВ)	ПС-39 «ш. им. А.Д. Рубана» (1 секция 6 кВ)
1	2	3	4	5
2	1,50	4,20	2,25	2,25
3	3,00	4,50	2,25	2,25
4	0,70	1,25	2,10	1,90
5	4,00	6,00	6,60	7,40
6	0,30	2,10	1,00	2,10
7	3,00	7,60	4,50	4,50
8	0,30	2,45	0,60	1,00
9	1,00	1,50	0,80	0,90
10	0,30	0,74	0,40	1,75
11	2,00	3,00	3,00	3,80
12	0,20	0,48	0,32	0,30
13	2,00	3,00	3,00	3,00
14	0,20	0,30	0,30	0,20
15	0,30	0,45	0,40	0,45
16	0,20	0,30	0,30	0,20
17	1,50	2,25	2,25	2,25
18	0,20	0,25	0,30	0,20
19	1,00	1,50	1,50	1,50

продолжение табл. П.1.2

1	2	3	4	5
20	0,20	0,20	0,20	0,20
21	0,20	0,30	0,20	0,20
22	0,20	0,25	0,20	0,20
23	1,00	1,50	1,50	1,50
24	0,20	0,25	0,15	0,20
25	1,00	1,50	1,50	1,50
26	0,20	0,30	0,20	0,20
27	0,20	0,30	0,20	0,21
28	0,20	0,50	0,20	0,20
29	1,00	1,50	1,50	1,44
30	0,20	0,20	0,15	0,20
31	1,00	0,80	0,75	0,91
32	0,20	0,15	0,18	0,20
33	0,20	0,15	0,18	0,16
34	0,20	0,16	0,20	0,20
35	1,00	0,60	0,77	0,82
36	0,20	0,14	0,17	0,20
37	1,00	0,70	0,85	0,82
38	0,20	0,18	0,20	0,20
39	1,00	0,55	0,76	0,84
40	0,20	0,15	0,17	0,20

**Приложение 2. Данные экспериментальных исследований показателей качества электроэнергии
в подземных сетях угольных шахт**

Таблица П.2.1 – Экспериментальные значения по значению n-й гармонической составляющей напряжения в подземных электрических сетях угольных шахт

Номер гармоники	Выемочной участок шахты «С.М. Кирова», уровень гармоники фаза А, %	Выемочной участок шахты «С.М. Кирова», уровень гармоники фаза С, %	Выемочной участок шахты «Полысаевская», уровень гармоники фаза А, %	Выемочной участок шахты «Полысаевская», уровень гармоники фаза С, %
1	2	3	4	5
2	0	0	0	0
3	3,56356	3,53353	3,81381	3,78378
4	0	0	0	0
5	6,98698	6,92692	7,61761	7,54754
6	0	0	0	0
7	5,48548	5,43543	4,63463	4,59459
8	0	0	0	0
9	0,89089	0,88088	0,81081	0,8008
10	0	0	0	0
11	2,44244	2,42242	3,13313	3,1031
12	0	0	0	0
13	2,66266	2,64264	2,19219	2,17217
14	0	0	0	0
15	0,29029	0,29029	0,36036	0,36036
16	0	0	0	0
17	1,75175	1,73173	1,59159	1,58158
18	0	0	0	0

Продолжение табл. П.2.1

1	2	3	4	5
19	0,98098	0,97097	0,88088	0,87087
20	0	0	0	0
21	0,15015	0,15015	0,16016	0,16016
22	0	0	0	0
23	0,96096	0,95095	0,95095	0,94094
24	0	0	0	0
25	0,32032	0,32032	0,86086	0,85085
26	0	0	0	0
27	0,34034	0,34034	0,16016	0,16016
28	0	0	0	0
29	0,41041	0,41041	0,08008	0,08008
30	0	0	0	0
31	0,66066	0,65065	0,45045	0,45045
32	0	0	0	0
33	0,11011	0,11011	0,18018	0,18018
34	0	0	0	0
35	0,57057	0,56056	0,68068	0,67067
36	0	0	0	0
37	0,51051	0,51051	0,84084	0,83083
38	0	0	0	0
39	0,23023	0,23023	0,46046	0,46046
40	0	0	0	0

**Приложение 3. Данные экспериментальных исследований
электротехнических параметров
подземного технологического оборудования угольной шахты**

Таблица П.3.1 – Мгновенные значения тока и напряжения в системах электропривода выемочного комбайна

Время	Ток подача левый, А	Ток подача правый, А	Напряжение подача, В	Напряжение комбайн, В	Ток резания правый, А	Ток резания левый, А
1	2	3	4	5	6	7
1:00	87,81	88,68	175,41	3201	33	35
1:01	91,34	91,16	175,41	3193	43	29
1:02	58,21	59,55	175,41	3258	45	30
1:03	51,05	50,83	175,41	3233	31	37
1:04	50,5	50,56	175,41	3241	34	36
1:05	53,46	53,36	175,41	3225	34	39
1:06	57,46	57,43	175,41	3225	38	45
1:07	62,4	57,68	175,41	3217	37	47
1:08	71,5	71,6	175,41	3169	44	65
1:09	64,51	63,18	175,41	3241	27	65
1:10	68,36	68,31	175,41	3241	28	29
1:11	74,56	74,89	175,41	3209	27	55
1:12	66,79	66,95	175,41	3250	28	28
1:13	66,86	66,42	175,41	3258	29	29
1:14	65,07	65,29	175,41	3258	29	29
1:15	64,22	64,35	175,41	3250	29	28
1:16	65,14	65,01	175,41	3322	30	30
1:17	65,36	64,07	175,41	3427	0	0
1:18	0	0	0	3419	0	0
1:19	0	0	0	3362	0	0
1:20	75,97	74,48	167,16	3250	29	28
1:21	83,88	84,07	167,16	3233	39	28
1:22	95,43	95,93	167,16	3225	38	28
1:23	95,69	96,06	167,16	3209	34	29
1:24	92,97	93,1	167,16	3241	36	30
1:25	92,23	92,06	167,16	3250	32	29
1:26	103,41	102,62	167,16	3233	38	29
1:27	100,92	100,96	167,16	3225	34	31
1:28	95,09	94,94	167,16	3217	33	29
1:29	96,92	97,4	167,16	3217	37	29
1:30	94,92	94,29	167,16	3241	33	34
1:31	88,56	88,62	167,16	3233	32	30
1:32	88,73	88,33	167,16	3233	36	29
1:33	83,57	84,37	167,16	3354	0	0
1:34	0	0	0	3362	0	0

продолжение табл. П.3.1

1	2	3	4	5	6	7
1:35	0	0	0	3362	0	0
1:36	0	0	0	3370	0	0
1:37	0	0	0	3362	0	0
1:38	58,67	60,83	180,23	3354	0	0
1:39	91,32	91,29	180,23	3225	40	31
1:40	88,52	88,65	180,23	3233	35	28
1:41	92,33	92,7	180,23	3241	42	29
1:42	96,07	95,95	180,23	3233	41	31
1:43	99,86	99,94	180,23	3217	43	32
1:44	95,66	95,86	180,23	3217	38	28
1:45	90,56	90,59	180,23	3209	48	28
1:46	87,99	88,3	180,23	3217	33	28
1:47	81,25	80,33	180,23	3354	0	0
1:48	0	0	0	3354	0	0
1:49	0	0	0	3346	0	0
1:50	0	0	0	3346	0	0
1:51	0	0	0	3387	0	0
1:52	92,57	92,37	181,26	3298	0	0
1:53	96,39	96,18	181,26	3266	35	30
1:54	92,24	92,65	181,26	3258	35	31
1:55	91,61	91,25	181,26	3266	34	35
1:56	89,7	89,91	181,26	3266	34	34
1:57	91,16	90,68	181,26	3250	38	35
1:58	88,92	89,19	181,26	3241	43	28
1:59	95,76	95,29	181,26	3266	44	29
2:00	95,35	94,43	181,26	3266	37	33
2:01	0	0	0	3403	0	0
2:02	0	0	0	3419	0	0
2:03	0	0	0	3419	0	0
2:04	0	0	0	3419	0	0
2:05	98,37	99,24	177,11	3282	29	33
2:06	101,6	101,42	177,11	3274	45	32
2:07	98,51	98,55	177,11	3282	38	33
2:08	99,59	99,73	177,11	3266	46	29
2:09	83,71	83,72	177,11	3395	0	0
2:10	0	0	0	3395	0	0
2:11	0	0	0	3395	0	0
2:12	0	0	0	3387	0	0
2:13	0	0	0	3379	0	0
2:14	97,14	97,88	180,7	3241	36	36
2:15	94,42	94,67	180,7	3241	40	32
2:16	95,08	95,58	180,7	3250	38	30
2:17	93,55	93,55	180,7	3250	35	29
2:18	94,04	94,33	180,7	3258	32	28
2:19	96,11	96,21	180,7	3241	37	28
2:20	91,65	91,59	180,7	3250	29	29

продолжение табл. П.3.1

1	2	3	4	5	6	7
2:21	0	0	0	3370	0	0
2:22	0	0	0	3370	0	0
2:23	0	0	0	3362	0	0
2:24	0	0	0	3346	0	0
2:25	91,57	91,56	162,51	3250	34	29
2:26	96,36	94,46	162,51	3250	45	30
2:27	101,13	101,51	162,51	3225	38	33
2:28	93,59	93,1	162,51	3241	34	30
2:29	89,67	89,3	162,51	3370	43	29
2:30	81,03	81,73	162,51	3274	35	28
2:31	90,99	91,05	162,51	3250	35	29
2:32	92,16	91,74	162,51	3250	50	31
2:33	63,46	63,92	162,51	3266	35	28
2:34	65,67	65,17	162,51	3258	38	29
2:35	79,71	78,98	162,51	3266	44	28
2:36	53,42	53,7	162,51	3233	39	28
2:37	48,76	48,99	162,51	3266	39	28
2:38	47,49	47,61	162,51	3266	31	35
2:39	55,9	55,91	162,51	3241	36	42
2:40	63,27	63,51	162,51	3241	47	41
2:41	70,45	70,4	162,51	3266	36	29
2:42	86,39	86,35	162,51	3258	30	29
2:43	89,65	89,52	162,51	3241	40	29
2:44	89,55	89,44	162,51	3258	39	29
2:45	91,51	92,02	162,51	3258	35	29
2:46	101,71	97,47	162,51	3290	59	29
2:47	73,3	73,13	162,51	3290	29	28
2:48	72,47	70,86	162,51	3233	45	29
2:49	56,09	57,04	162,51	3209	47	28
2:50	81,78	81,77	162,51	3290	31	31
2:51	51,44	52,1	162,51	3266	40	29
2:52	48,74	48,95	162,51	3274	58	28
2:53	47,61	47,54	162,51	3298	36	28
2:54	47,54	47,68	162,51	3298	34	30
2:55	47,69	47,69	162,51	3274	33	29

Таблица П.3.2 - Мгновенные значения тока в системах электропривода
забойного конвейера, дробилки, перегружателя

Время	Забойный конвейер М1, А	Забойный конвейер М2, А	Забойный конвейер М всп, А	Дробилка, А	Перегружатель, А
1	2	3	4	5	6
1:00	63	65	173	51	35
1:01	71	65	184	118	35
1:02	65	69	189	155	36
1:03	67	63	194	161	35
1:04	69	67	185	153	35
1:05	65	69	192	164	36
1:06	72	69	181	164	35
1:07	66	63	199	177	35
1:08	64	62	193	209	34
1:09	64	66	191	118	36
1:10	66	66	175	69	35
1:11	67	66	173	88	36
1:12	65	66	175	71	36
1:13	64	67	164	61	35
1:14	66	69	161	57	36
1:15	65	68	176	54	36
1:16	0	0	0	0	0
1:17	0	0	0	0	0
1:18	0	0	0	0	0
1:19	73	69	215	96	38
1:20	64	66	172	77	35
1:21	70	65	185	67	35
1:22	66	69	194	117	35
1:23	78	77	171	130	34
1:24	72	76	198	149	36
1:25	84	81	178	150	36
1:26	71	73	192	151	36
1:27	75	71	206	141	34
1:28	69	72	213	168	35
1:29	70	73	204	151	35
1:30	76	74	208	147	35
1:31	80	75	196	148	36
1:32	79	78	186	158	35
1:33	76	82	177	142	38
1:34	77	75	178	192	40
1:35	63	65	166	71	38
1:36	66	65	183	55	38
1:37	64	66	171	52	38
1:38	64	68	167	56	38
1:39	69	67	169	52	35
1:40	74	73	167	57	36

продолжение табл. П.3.2

1	2	3	4	5	6
1:41	80	75	188	154	35
1:42	85	79	185	136	36
1:43	85	84	212	138	35
1:44	81	79	227	192	38
1:45	80	81	225	168	35
1:46	81	83	209	151	35
1:47	73	74	222	146	38
1:48	71	69	200	145	38
1:49	70	70	174	126	37
1:50	72	63	181	126	37
1:51	71	72	163	92	39
1:52	70	67	170	59	37
1:53	69	71	208	102	37
1:54	73	64	236	63	37
1:55	78	79	241	172	37
1:56	85	82	207	169	37
1:57	81	80	205	145	37
1:58	89	84	215	140	36
1:59	89	86	244	135	37
2:00	102	102	249	171	37
2:01	92	95	230	150	40
2:02	83	80	235	223	42
2:03	74	69	203	162	40
2:04	68	68	209	145	41
2:05	68	70	195	67	37
2:06	83	81	184	71	37
2:07	78	82	199	74	37
2:08	105	106	202	90	37
2:09	107	102	216	147	39
2:10	92	92	220	176	40
2:11	78	79	221	176	40
2:12	73	69	200	120	39
2:13	68	68	201	153	39
2:14	64	66	219	147	36
2:15	73	70	190	60	36
2:16	90	77	195	57	36
2:17	103	102	192	79	36
2:18	89	91	233	173	36
2:19	83	83	243	163	36
2:20	107	102	241	157	36
2:21	99	90	258	146	39
2:22	92	94	233	140	39
2:23	80	77	211	187	38
2:24	69	67	209	185	38
2:25	64	63	246	65	36

продолжение табл. П.3.2

1	2	3	4	5	6
2:26	69	71	185	59	35
2:27	68	70	216	114	36
2:28	89	84	221	52	36
2:29	95	102	238	135	40
2:30	100	108	208	163	37
2:31	89	97	216	148	36
2:32	87	94	235	172	36
2:33	76	77	259	182	36
2:34	84	89	204	75	36
2:35	84	82	195	98	36
2:36	71	69	212	167	34
2:37	65	70	204	124	36
2:38	75	67	199	87	36
2:39	68	63	228	60	36
2:40	99	89	209	60	36
2:41	100	99	268	169	37
2:42	169	164	117	158	37
2:43	85	86	309	174	36
2:44	75	77	307	232	46
2:45	74	73	301	193	36
2:46	95	95	277	107	37
2:47	128	132	179	161	37
2:48	87	79	276	136	36
2:49	90	86	211	154	35
2:50	64	62	259	187	37
2:51	69	74	192	94	36
2:52	70	67	202	87	36
2:53	67	71	198	82	37
2:54	72	69	203	75	37
2:55	78	73	182	61	37

Таблица П.3.3 - Мгновенные значения мощности на выемочном комбайне, забойном конвейере, дробилки и перегружателя

Время	Мгновенная мощность выемочного комбайн, Вт	Мгновенная мощность забойного конвейера, Вт	Мгновенная мощность дробилки, Вт	Мгновенная мощность перегружателя, Вт
1	2	3	4	5
1:00	391,64	513,34	84,01	57,66
1:01	411,49	545,74	194,38	57,66
1:02	416,32	550,86	255,33	59,30
1:03	375,54	552,56	265,22	57,66
1:04	385,83	547,45	252,04	57,66
1:05	400,13	555,97	270,16	59,30
1:06	450,47	549,15	270,16	57,66
1:07	455,63	559,38	291,57	57,66
1:08	574,09	544,04	344,29	56,01
1:09	499,41	547,45	194,38	59,30
1:10	332,04	523,57	113,66	57,66
1:11	452,64	521,86	144,96	59,30
1:12	327,19	521,86	116,96	59,30
1:13	337,49	503,10	100,49	57,66
1:14	336,73	504,81	93,90	59,30
1:15	330,71	526,98	88,95	59,30
1:16	352,17	0,00	0,00	0,00
1:17	0,00	0,00	0,00	0,00
1:18	0,00	0,00	0,00	0,00
1:19	0,00	608,84	158,14	62,60
1:20	334,55	515,04	126,84	57,66
1:21	385,79	545,74	110,37	57,66
1:22	385,95	561,09	192,73	57,66
1:23	370,07	555,97	214,15	56,01
1:24	386,22	590,08	245,45	59,30
1:25	362,36	584,97	247,10	59,30
1:26	395,21	573,03	248,74	59,30
1:27	383,73	600,31	232,27	56,01
1:28	365,58	603,73	276,75	57,66
1:29	385,89	591,79	248,74	57,66
1:30	391,85	610,55	242,15	57,66
1:31	363,89	598,61	243,80	59,30
1:32	378,37	584,97	260,27	57,66
1:33	0,00	571,32	233,92	62,60
1:34	0,00	562,80	316,28	65,89
1:35	0,00	501,40	116,96	62,60
1:36	0,00	535,51	90,60	62,60
1:37	0,00	513,34	85,66	62,60
1:38	0,00	509,93	92,25	62,60
1:39	411,44	520,16	85,66	57,66

продолжение табл. П.3.3

1	2	3	4	5
1:40	372,15	535,51	93,90	59,30
1:41	413,79	584,97	253,68	57,66
1:42	419,64	595,20	224,03	59,30
1:43	434,42	649,77	227,33	57,66
1:44	388,90	660,01	316,28	62,60
1:45	433,36	658,30	276,75	57,66
1:46	360,78	636,13	248,74	57,66
1:47	0,00	629,31	240,51	62,60
1:48	0,00	579,85	238,86	62,60
1:49	0,00	535,51	207,56	60,95
1:50	0,00	538,92	207,56	60,95
1:51	0,00	521,86	151,55	64,25
1:52	0,00	523,57	97,19	60,95
1:53	389,43	593,49	168,02	60,95
1:54	391,47	636,13	103,78	60,95
1:55	406,37	678,77	283,34	60,95
1:56	400,61	637,83	278,39	60,95
1:57	423,89	624,19	238,86	60,95
1:58	412,21	661,71	230,62	59,30
1:59	428,11	714,58	222,39	60,95
2:00	413,11	772,56	281,69	60,95
2:01	0,00	711,17	247,10	65,89
2:02	0,00	678,77	367,35	69,19
2:03	0,00	590,08	266,86	65,89
2:04	0,00	588,38	238,86	67,54
2:05	376,39	567,91	110,37	60,95
2:06	450,54	593,49	116,96	60,95
2:07	420,44	612,25	121,90	60,95
2:08	438,87	704,35	148,26	60,95
2:09	0,00	724,81	242,15	64,25
2:10	0,00	689,00	289,92	65,89
2:11	0,00	644,66	289,92	65,89
2:12	0,00	583,26	197,68	64,25
2:13	0,00	574,73	252,04	64,25
2:14	421,43	595,20	242,15	59,30
2:15	419,85	567,91	98,84	59,30
2:16	401,79	617,37	93,90	59,30
2:17	381,39	677,06	130,14	59,30
2:18	363,00	704,35	284,98	59,30
2:19	386,77	697,53	268,51	59,30
2:20	351,19	767,45	258,63	59,30
2:21	0,00	762,33	240,51	64,25
2:22	0,00	714,58	230,62	64,25
2:23	0,00	627,60	308,05	62,60
2:24	0,00	588,38	304,75	62,60

продолжение табл. П.3.3

2:25	370,54	636,13	107,07	59,30
2:26	430,73	554,27	97,19	57,66
2:27	411,47	603,73	187,79	59,30
2:28	375,40	671,94	85,66	59,30
2:29	426,22	741,87	222,39	65,89
2:30	367,91	709,46	268,51	60,95
2:31	375,14	685,59	243,80	59,30
2:32	458,24	709,46	283,34	59,30
2:33	358,65	702,64	299,81	59,30
2:34	378,22	642,95	123,55	59,30
2:35	410,15	615,66	161,44	59,30
2:36	370,02	600,31	275,10	56,01
2:37	371,07	578,14	204,27	59,30
2:38	365,55	581,56	143,32	59,30
2:39	425,28	612,25	98,84	59,30
2:40	477,36	677,06	98,84	59,30
2:41	371,66	796,44	278,39	60,95
2:42	349,30	767,45	260,27	60,95
2:43	397,83	818,61	286,63	59,30
2:44	394,67	782,80	382,17	75,78
2:45	376,26	764,04	317,93	59,30
2:46	501,21	796,44	176,26	60,95
2:47	335,96	748,69	265,22	60,95
2:48	412,57	753,80	224,03	59,30
2:49	407,46	660,01	253,68	57,66
2:50	364,68	656,59	308,05	60,95
2:51	382,23	571,32	154,85	59,30
2:52	464,92	578,14	143,32	59,30
2:53	358,85	573,03	135,08	60,95
2:54	358,87	586,67	123,55	60,95
2:55	346,81	567,91	100,49	60,95

**Приложение 4. Характеристика основного технологического оборудования выемочных и проходческих участков
УГОЛЬНЫХ ШАХТ**

Таблица П.4.1 – Характеристика высокопроизводительных выемочных комбайнов

Название комбайна	Угол наклона	Мощность пласта	Механизм подачи		Электродвигатель привода подачи			Электродвигатель привода резания			Изготовитель
			Тип электропривода	Максимальная скорость, м/мин	Количество	Мощность, кВт	Напряжение, В	Количество	Мощность, кВт	Напряжение, В	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
УКД300	35	0,85-1,5	ПЧ-АД	13	2	30	-	2	150	1140	Горловский машиностроительный завод
УКН400	35	0,8-1,5	ПЧ-АД	13,6	2	30	660	2	180	1140	ЗАО "Новокраматорский машзавод"
МВ320Е	35	1,0-2,3	ПЧ-АД	11,5	2	22	500	2	135	1000;1140	Акционерное общество СЗМТ
МВ350Е	25	1,3-2,6	ПЧ-АД	11,5	2	22	500	2	150	1000; 1440	Акционерное общество СЗМТ
МВ390Е	35	1,3-2,6	ПЧ-АД	11,5	2	22	-	2	170	1000;1440	Акционерное общество СЗМТ
МВ9-Н	10	1,4-2,0	ПЧ-АД	7	-	-	-	1	190	1000	Акционерное общество СЗМТ
МВ9-НМ	23	1,4-2,42	ПЧ-АД	7	1	22	500	1	190	1000	Акционерное общество СЗМТ
КДК500	35	1,35-3,2	ПЧ-АД	20	2	45	-	2	250	1140	Горловский машиностроительный завод
МВ9-В	10	1,62-3,25	ПЧ-АД	7	1	22	500	1	190	1000	Акционерное общество СЗМТ
МВ9-VM	23	1,6-3,15	ПЧ-АД	7	1	22	500	1	190	1000	Акционерное общество СЗМТ
SL300 версия 1	35	1,5-3,5	УВ-ДПТ	24,5	2	35	-	1	275	1140	фирма "Айкхофф"
SL300 версия 2	35	1,6-4,3	УВ-ДПТ	14	2	35	-	2	300	1000	фирма "Айкхофф"
SL300 версия 3	35	1,6-4,3	УВ-ДПТ	14	2	35	-	2	300;400	1140	фирма "Айкхофф"
SL300 версия 4	35	1,6-4,3	ПЧ-АД	21	2	80	-	2	480	3300	фирма "Айкхофф"
KSW-750E	35	1,4-3,5	ПЧ-АД	10,5; 21,5	2	60	500	2	200; 300	1000	Забжанский механический завод
МВ10-2V2P	25	1,4-3,8	ПЧ-АД	11,5	2	22	500	2	200	1000	Акционерное общество СЗМТ
7LS1	35	1,42-3,20	УВ-ДПТ	20	2	50	-	2	240; 375; 405	2300; 3300; 4160	фирма "Джой"
7LS2	35	1,42-3,20	УВ-ДПТ ПЧ-АД	12,1; 18	2	50 - DC 80 - AC	-	2	420; 375; 405	2300; 3300; 4160	фирма "Джой"
KSW/E-620	35	1,6-3,85	ПЧ-АД	7,8-15,6	2	45	-	2	200; 250;	1000	Забжанский механический завод
МВ480Е	35	1,8-4	ПЧ-АД	15	2	37	500	2	200	1000; 1440	Акционерное общество СЗМТ
МВ500Е	35	1,8-4	ПЧ-АД	15	2	37	500	2	200	1000; 1140	Акционерное общество СЗМТ

продолжение табл. П.4.1.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
MB580E	35	1,8-4	ПЧ-АД	15	2	37	500	2	250	1000; 1140	Акционерное общество CZMT
MB600E	35	1,8-4	ПЧ-АД	15	2	37	500	2	250	1000; 1140	Акционерное общество CZMT
КДК700	35	2-4,3	ПЧ-АД	20	2	60	-	2	355	1140	Горловский машиностроительный завод
7LS3	35	1,42-4,1	УВ-ДПТ ПЧ-АД	20; 28	2	50 - DC 80 - AC	-	2	420; 375; 405	2300; 3300; 4160	фирма "Джой"
1КШЭ	35	2,2-4,25	УВ-ДПТ	8	2	19	275	2	200	660; 1140	Горловский машиностроительный завод
1КШЭУ	35	2,2-4,2	УВ-ДПТ	8	2	19,6	-	2	160; 200	660; 1140	ОАО "УЗТС"
6LS5	35	1,9-5,1	УВ-ДПТ ПЧ-АД	21,3	2	70 - DC 110 - AC	-	2	425; 610; 580	2300; 3300; 4160	фирма "Джой"
2КШЭУ	35	2,5-5	УВ-ДПТ	15	2	43	-	2	315	1140	ОАО "УЗТС"
MB700E	35	2,5-5	ПЧ-АД	15	2	45	500	2	300	1000; 1140	Акционерное общество CZMT
MB712E	35	2,5-5	ПЧ-АД	15	2	45	500	2	300	1000; 1140	Акционерное общество CZMT
SL500	35	2,4-5,2	ПЧ-АД	18; 14	2	60	-	2	450	1140	фирма "Айкхофф"
EL1000	35	1,8-6	УВ-ДПТ	25	2	70	-	2	600	1000; 2300; 3300; 4160	Фирма DBT

Таблица П.4.2 – Характеристика проходческих комбайнов

Название комбайна	Напряжение питания, В	Суммарная мощность, кВт	Мощность нелинейной нагрузки, кВт	Страна производитель
1ГПКС	660/1140	165	0	Россия
КП-21	660/1140	186,5	0	Россия
КП-25	660/1140	301	0	Россия
КПЛ	660/1140	202,5	0	Россия
КПД	660/1140	210	0	Россия
КПУ	660/1140	375	0	Россия
П110	660/1140	305	0	Россия
П160	660/1140	237,5	0	Россия
П220	660/1140	305	0	Россия
КСП-42	660/1140	390	0	Россия
КПУ	660/1140	375	0	Россия
КПЮ	660/1140	242	0	Россия
СМ-130	660/1140	232,5	0	Россия
КРТ	660/1140	264	0	Россия
JOY 12CV12	1140	496	96	США
JOY 12CV15	1140	496	96	США
JOY 12CV18	1140	373	40	США

Таблица П.4.3 - Характеристика забойных конвейеров

Тип скребкового конвейера	Производительность транспортирования, т/час	Скорость перемещения груза, м/с	Количество и мощность двигателей, кВт	Суммарная мощность двигателей с преобразовательными устройствами, кВт	Макс. общая длина конвейера, м	Производитель
СЗК 190/642	650	1,1	4X200	400	300	T Machinery a.s. (Чехия)
СЗК 190/800	700	1,1	4X250	500	300	T Machinery a.s. (Чехия)
СЗК 228/642	700	1,1	4X250	500	300	T Machinery a.s. (Чехия)
СЗК 228/732	900	1,1	4X315	630	350	T Machinery a.s. (Чехия)
СЗК 228/800	1000	1,1	4X315	630	350	T Machinery a.s. (Чехия)
СЗК 228/832	1100	1,1	4X315	630	350	T Machinery a.s. (Чехия)
СЗК 260/852	1200	1,1	4X315	630	350	T Machinery a.s. (Чехия)
СЗК 284/832	1200	1,1	4X400	800	350	T Machinery a.s. (Чехия)
СЗК 284/932	1400	1,1	4X400	800	350	T Machinery a.s. (Чехия)
СЗК 284/1032	1800	1,1	4X400	800	350	T Machinery a.s. (Чехия)
Famur FFC-7	1100	1,1	3X315	315	400	Famur (Польша)
Famur FFC-8	1600	1,1	3X500	500	400	Famur (Польша)
Famur FFC-9	2000	1,1	3X600	600	400	Famur (Польша)
Famur FFC-10	2500	1,1	3X1000	1000	400	Famur (Польша)
Famur FFC-11	3000	1,1	3X1200	1200	400	Famur (Польша)
PSZ-750 Nowomag	1000	1,1	4X400	800	400	Famur (Польша)
PSZ-850 Nowomag	1600	1,1	4X500	1000	400	Famur (Польша)
PSZ-950 Nowomag	2000	1,1	4X630	1260	400	Famur (Польша)
GLINIK 260/724	1050	1,1	3X315	315	400	Famur (Польша)
GLINIK 298/800	1700	1,1	3X500	500	400	Famur (Польша)
КСЮ271	813	1,1	3X250	250	250	Юргинский машзавод (Россия)
КСЮ381	1200	1,28	3X400	400	300	Юргинский машзавод (Россия)
КСЮ391	1600	1,28	3X400	400	300	Юргинский машзавод (Россия)
КСЮ3100	2000	1,4	3X700	700	300	Юргинский машзавод (Россия)

Таблица П.4.4 - Характеристика дробилок

Тип дробилки	Производительность, т/час	Количество и мощность привода, кВт	Система управления электроприводом	Производитель
DU1	1200	1X160	не регулируемая	Famur (Польша)
DU2	800	1X100	не регулируемая	Famur (Польша)
DU3	1500	1X160	не регулируемая	Famur (Польша)
DF9/12 P	2400	1X250	не регулируемая	Famur (Польша)
Glinik 800 (FRC-8)	1500	1X160	не регулируемая	Famur (Польша)
Glinik 900 (FRC-9)	1500	1X160	не регулируемая	Famur (Польша)
Glinik (FBL-10G)	2000	1X200	не регулируемая	Famur (Польша)
ДР1000Ю	1300	1X100; 2X55	не регулируемая	Юргинский машзавод (Россия)
ДР2500М	2500	1X250	не регулируемая	Юргинский машзавод (Россия)

Таблица П.4.4 - Характеристика перегружателей

Тип перегружателя	Производительность, т/час	Мощность привода, кВт	Длина перегружателя, м	Система управления электропривода	Скорость цепи, м/сек	Производитель
SZZ-1200/525	3500	525	45	ПЧ-АД	1,69	УгольМашГрупп (Китай)
SZZ-900/400	2000	400	45	ПЧ-АД	1,45	УгольМашГрупп (Китай)
SZZ-900/315	2000	315	45	ПЧ-АД	1,4	УгольМашГрупп (Китай)
SZZ-800/315	1800	315	45	ПЧ-АД	1,53	УгольМашГрупп (Китай)
SZZ-800/200	1800	200	45	ПЧ-АД	1,5	УгольМашГрупп (Китай)
SZZ-764/200	1500	200	45	ПЧ-АД	1,4	УгольМашГрупп (Китай)
ПС271	950	250	90	ПЧ-АД	1,13; 1,33; 1,4	Юргинский машзавод (Россия)
ПС281	1200	250	90	ПЧ-АД	1,33; 1,4	Юргинский машзавод (Россия)
ПСН3100	2000	315	60	ПЧ-АД	1,33; 1,4	Юргинский машзавод (Россия)
FSL-9 Glinik	2000	500	30,2	ПЧ-АД	1,53	Famur (Польша)

Таблица П.4.6 - Параметры технологического оборудования выемочного участка

Тип рабочей машины	Тип эл. двигателя на рабочей машине	Технические данные электродвигателей							
		P_n , кВт	I_n , А	I_n , А	$\frac{M_n}{M_n}$	$\frac{M_k}{M_n}$	$\cos\varphi$	кпд	U_n , В
Электропотребители ТЕК-1324 S=1500 кВА									
Выемочный комбайн (SL-300)	DEW64 ESM420	480	100	710	1,8	2,1	0,88	93,5	3300
	A5W200M42	80	55	385	2,2	2,4	0,87	92	440
	dWaE20/2-4	9	12,9	90,3	2,2	2,4	0,84	92	440
	DEW64 ESM420	480	100	710	1,8	2,1	0,88	93,5	3300
	A5W200M42	80	55	385	2,2	2,4	0,87	92	440
	dWaE20/2-4	9	12,9	90,3	2,2	2,4	0,84	92	440
$\sum P_n = 1138$ кВт									
Электропотребители ТЕК-1534 S=2500 кВА									
Забойный конвейер	3SG3F 450L-4A	500	310	25	1,5	1,7	0,88	93,0	1140
	3SG3F 450L-4A	500	310	25	1,5	1,7	0,88	93,0	1140
	3SG3F 450L-4A	500	310	25	1,5	1,7	0,88	93,0	1140
Перегрузатель FSL-9	3SG3F 450L-4A	500	310	25	1,5	1,7	0,88	93,0	1140
$\sum P_n = 2000$ кВт									
Потребители ТЕК-1324 S=1250 кВА									
Дробилка FBL-10G	2SGP 315M-4	200	144	576	2,1	2,3	0,92	94,0	1140
Станция орошения	2SGP 31M-4	20	14	58	2,1	2,3	0,92	94,0	1140
$\sum P_n = 200$ кВт									
Электропотребители ТЕК-1324 S=1250 кВА									
Маслостанция	2SGP 315M-4	200	144	576	2,1	2,3	0,92	94,0	1140

Приложения 5. Характеристика кабельной продукции подземных электрических сетей

Таблица П.5.1 – Характеристика кабельной продукции подземных электрических сетей

№	Потребитель	Напряжение, кВ	Марка кабеля	R*, Ом/км	L*, Гн/км	C*, мкФ/км
1	Выемочный участок	6	КВЭМББШВ6-3x120	0,153	0,166	0,31
2	Выемочный комбайн	3,3	PROTOMONT 3x70+3x(1,5STKON+35/3KON) +ÜLKON	0,277	0,3	0,34
3	Забойный конвейер	1,14	PROTOMONT 3x95+3x50/3E + 3x2,5S	0,21	0,29	0,31
4	Перегрузатель	1,14	PROTOMONT 3x95+3x50/3E + 3x2,5S	0,21	0,29	0,31
5	Дробилка,	1,14	PROTOMONT (КГЭШ) 3*50	0,393	0,32	0,3
6	Маслостанция выемочного участка	6	КВЭМББШВ6-3x35	0,353	0,56	0,36

Приложение 6. Характеристика понизительных подстанций энергопоездов подземных электрических сетей

Таблица П.6.1 - Характеристика понизительных подстанций энергопоездов подземных электрических сетей

Место установки	Потребитель	Тип	S _{ном} , кВА	U _{2ном} , кВ	I _{2ном} , А	I _{ном} , А	U _{кз} , %	P _{кз} , кВт	P _{хх} , кВт	Сопротивление, Ом		
										X _T	R _T	Z _T
Энергопоезд ВУ	Выемочный комбайн	ТЕК1324	1500	3,3	137,5	251	4,2	8,424	3,477	0,305	0,041	0,308
	Забойный конвейер, Перегрузатель	ТЕК1534	2500	1,14	229,1	1202	3,7	8,298	4,426	0,021	0,002	0,022
	Дробилка, станция орошения, осланцеватель	ТЕК1324	1250	1,14	114,6	601	3,5	3,882	2,878	0,040	0,004	0,042
Вентиляционный штрек	Маслостанция	ТЕК1324	1250	1,14	114,6	601	3,5	3,882	2,878	0,040	0,004	0,042

Приложение 7. Осциллограммы напряжения и тока в имитационной модели ЭТС угольной шахты

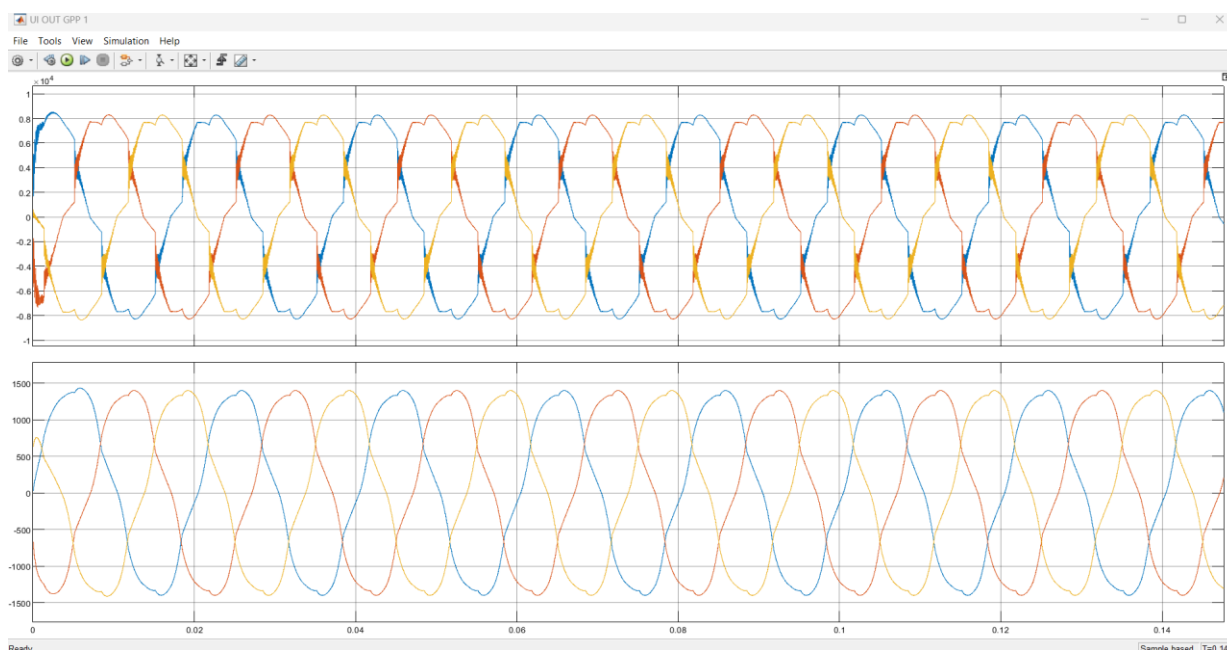


Рисунок П.7.1 - Осциллограммы напряжения и тока до подключения ФКУ на шинах ГПП (секция 1)

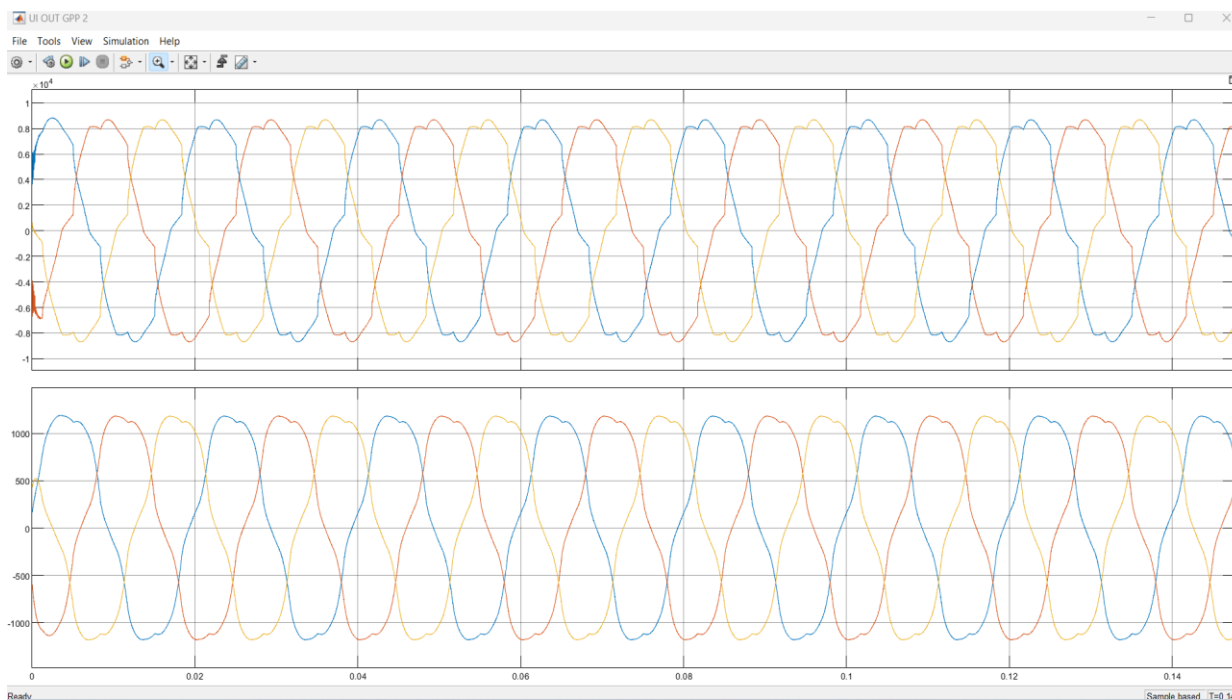


Рисунок П.7.2 - Осциллограммы напряжения и тока до подключения ФКУ на шинах ГПП (секция 2)

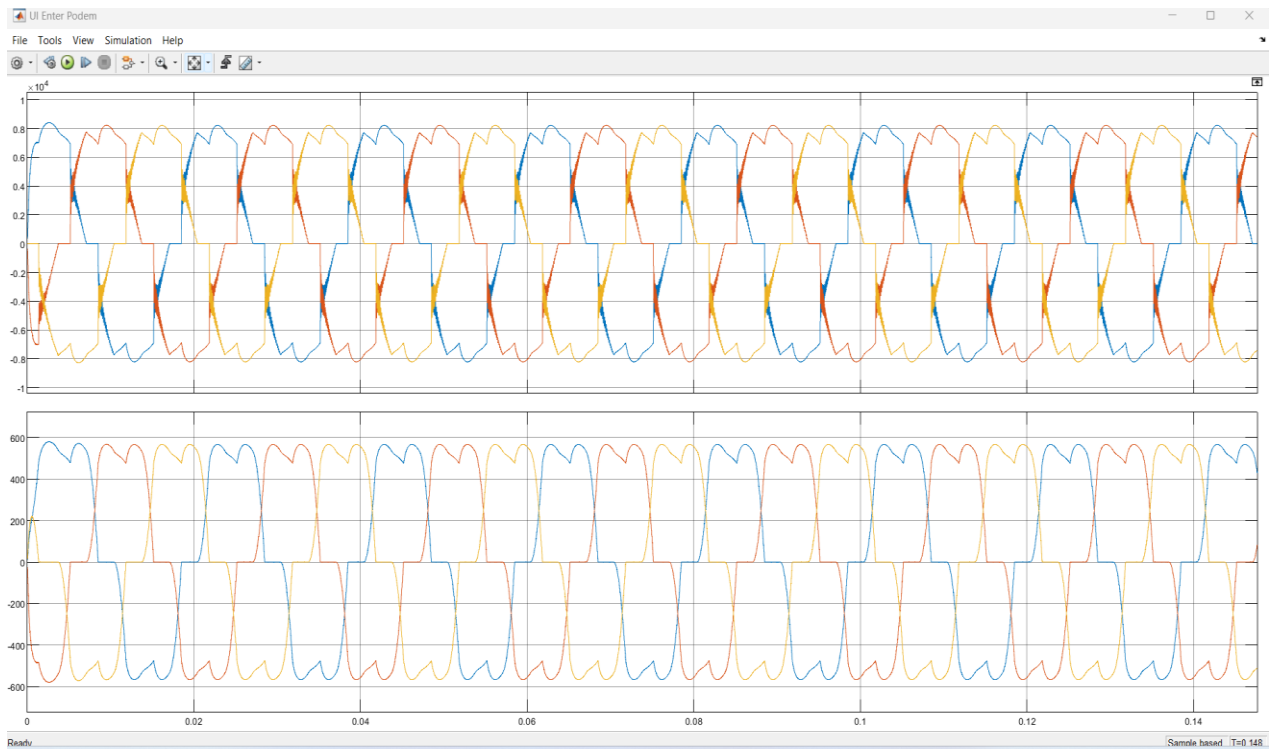


Рисунок П.7.3 - Осциллограммы напряжения и тока до подключения ФКУ на вводе подъемной установки 1

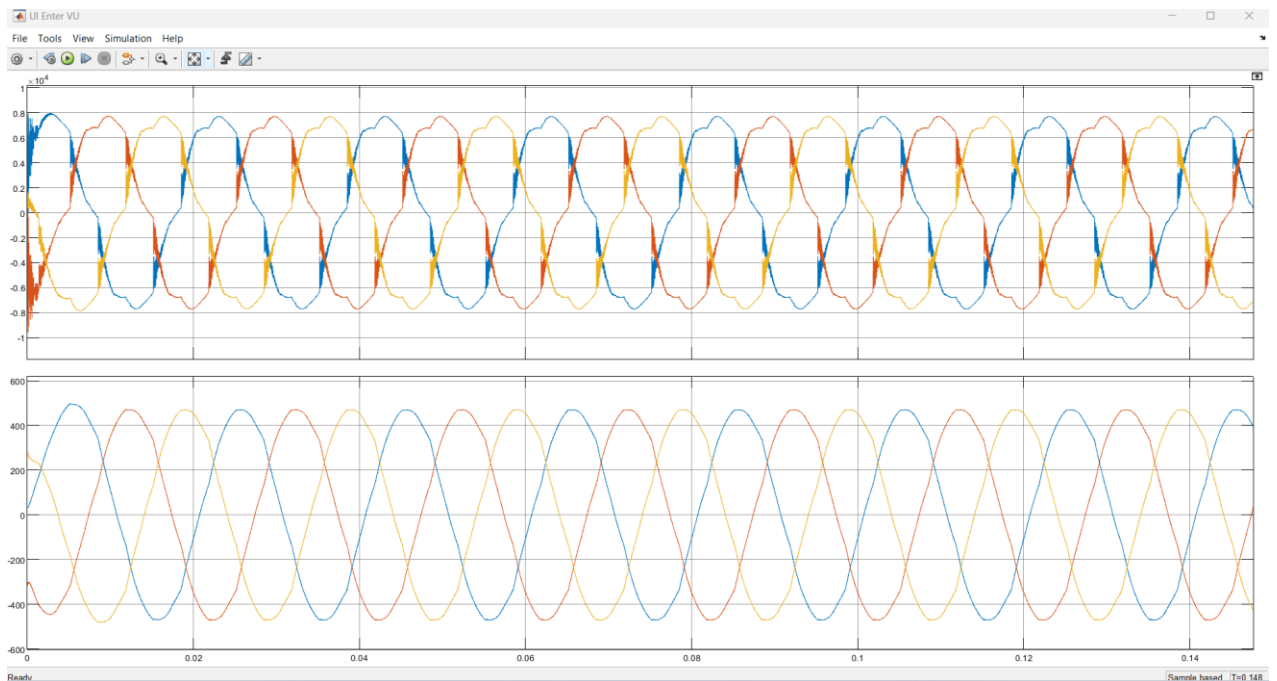


Рисунок П.7.4 - Осциллограммы напряжения и тока до подключения ФКУ на вводе выемочного участка

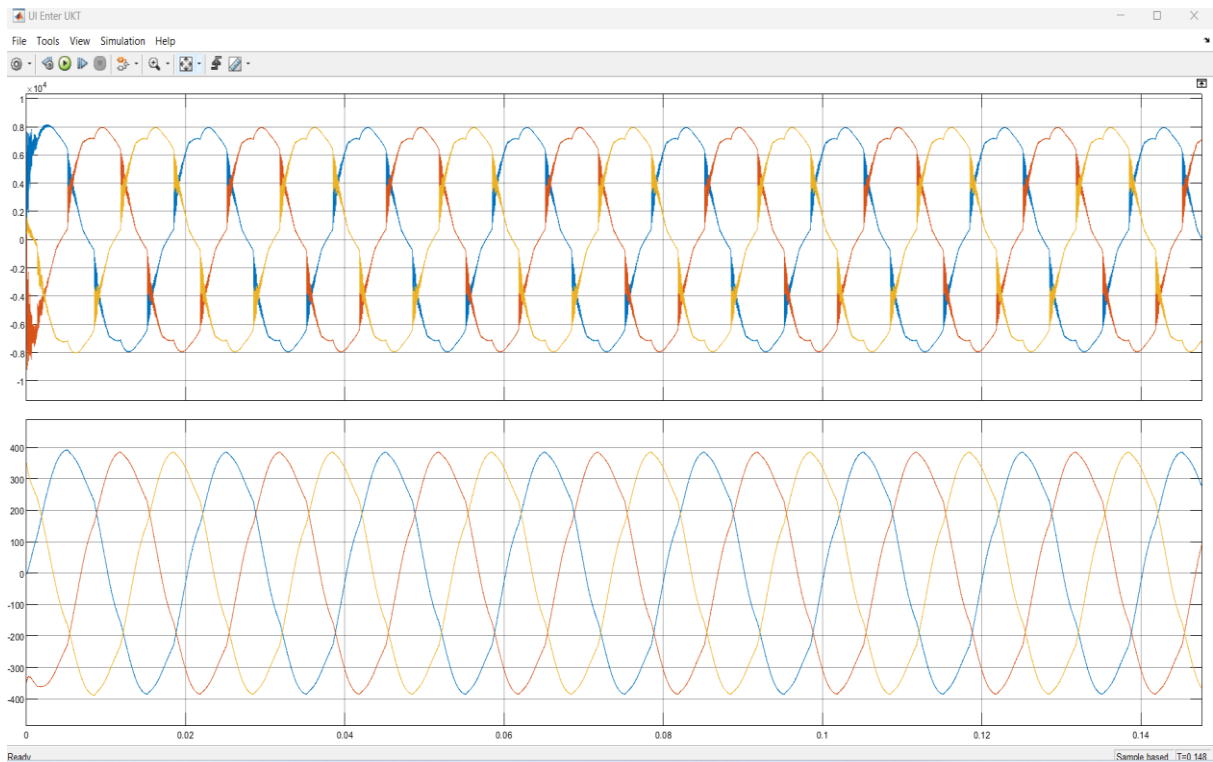


Рисунок П.7.5 - Осциллограммы напряжения и тока до подключения ФКУ на вводе участка конвейерного транспорта

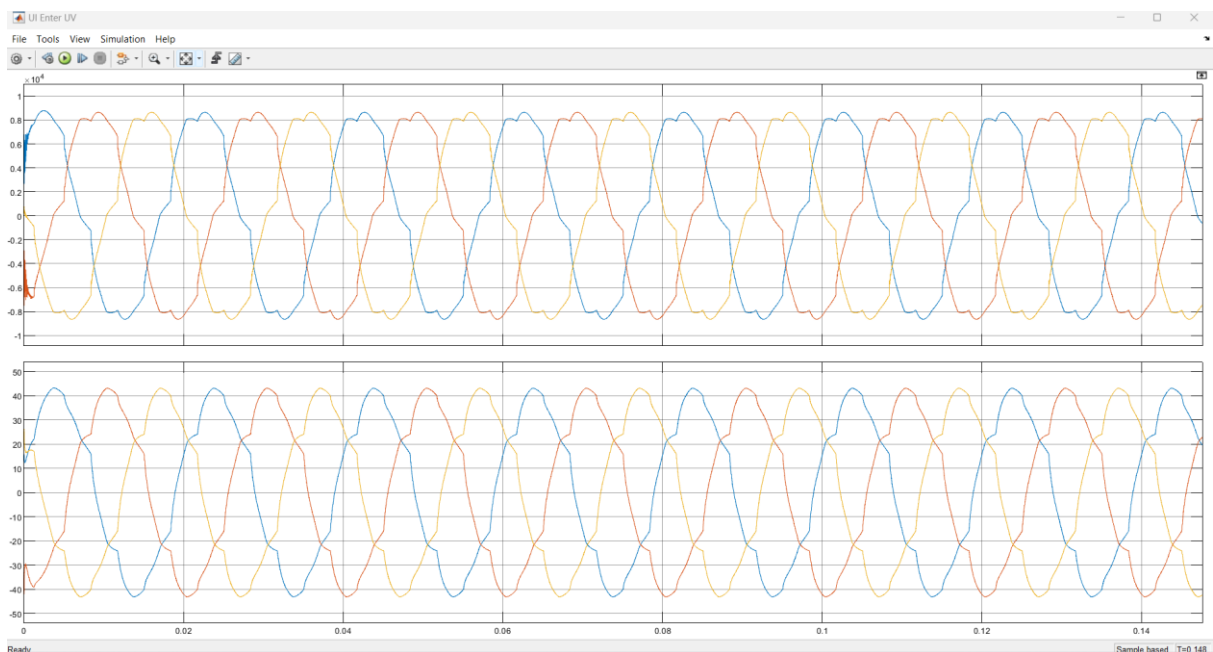


Рисунок П.7.6 - Осциллограммы напряжения и тока до подключения ФКУ на вводе участка водоотлива

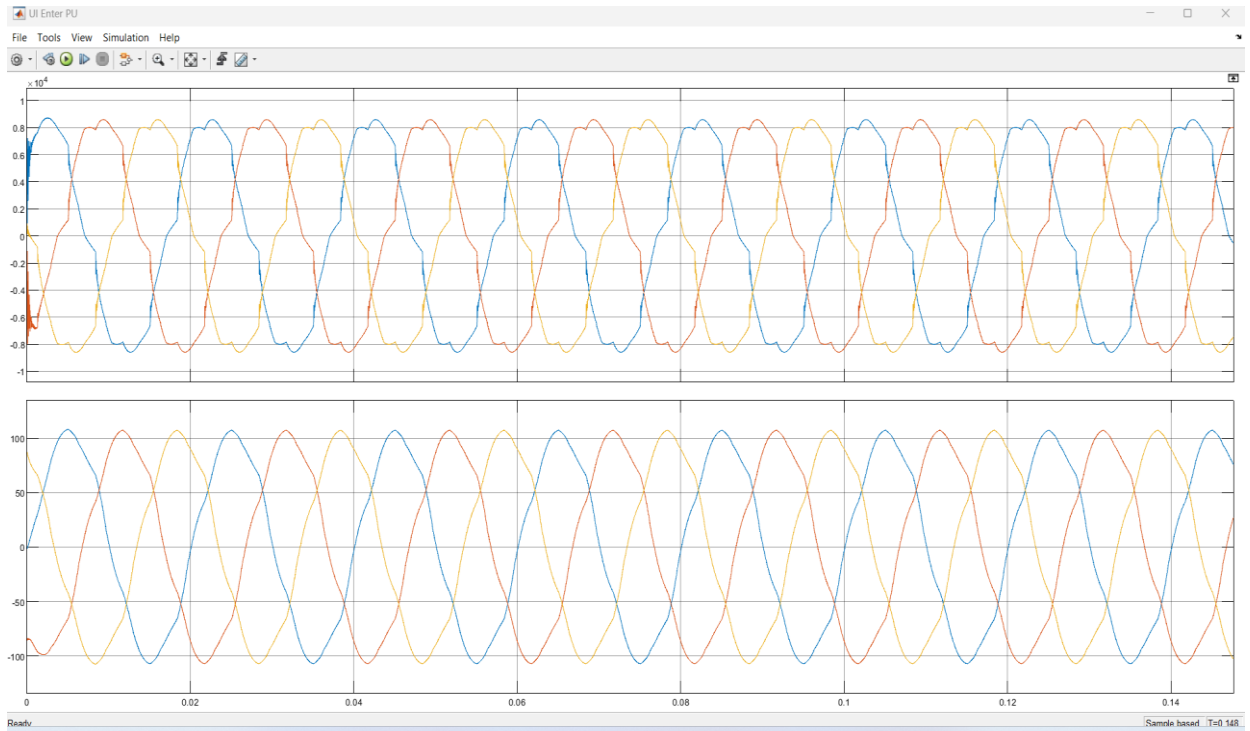


Рисунок П.7.7 - Осциллограммы напряжения и тока до подключения ФКУ на вводе проходческого участка 1

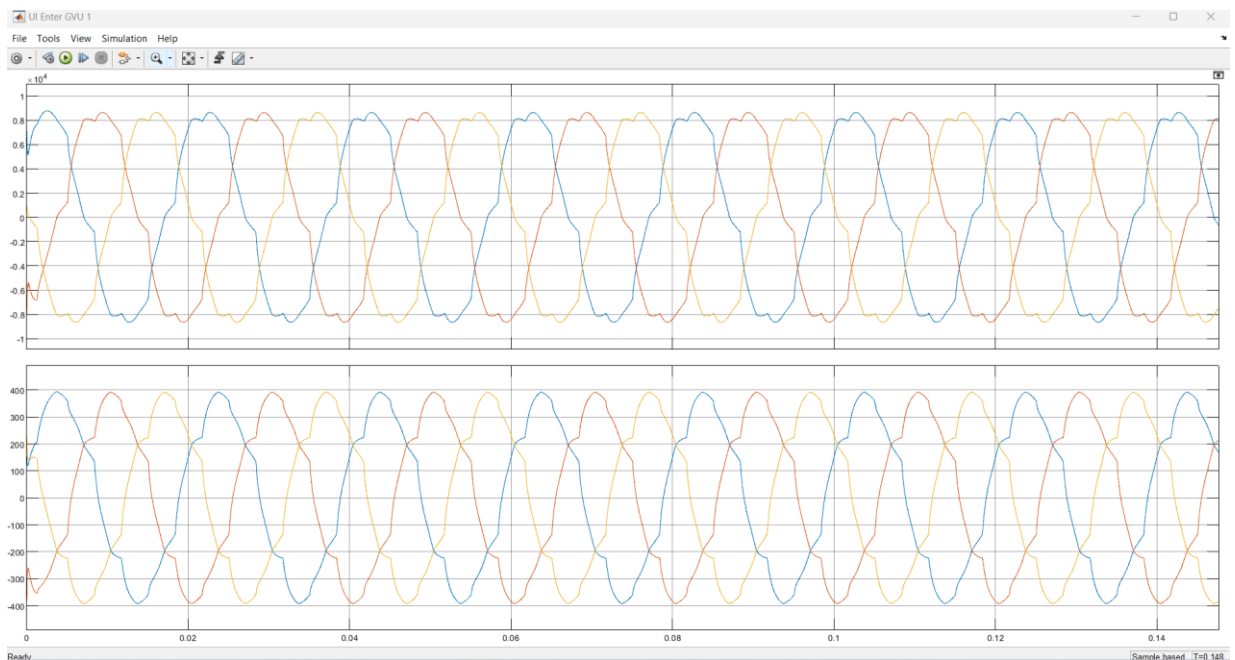


Рисунок П.7.8 - Осциллограммы напряжения и тока до подключения ФКУ на вводе вентилятора главного проветривания

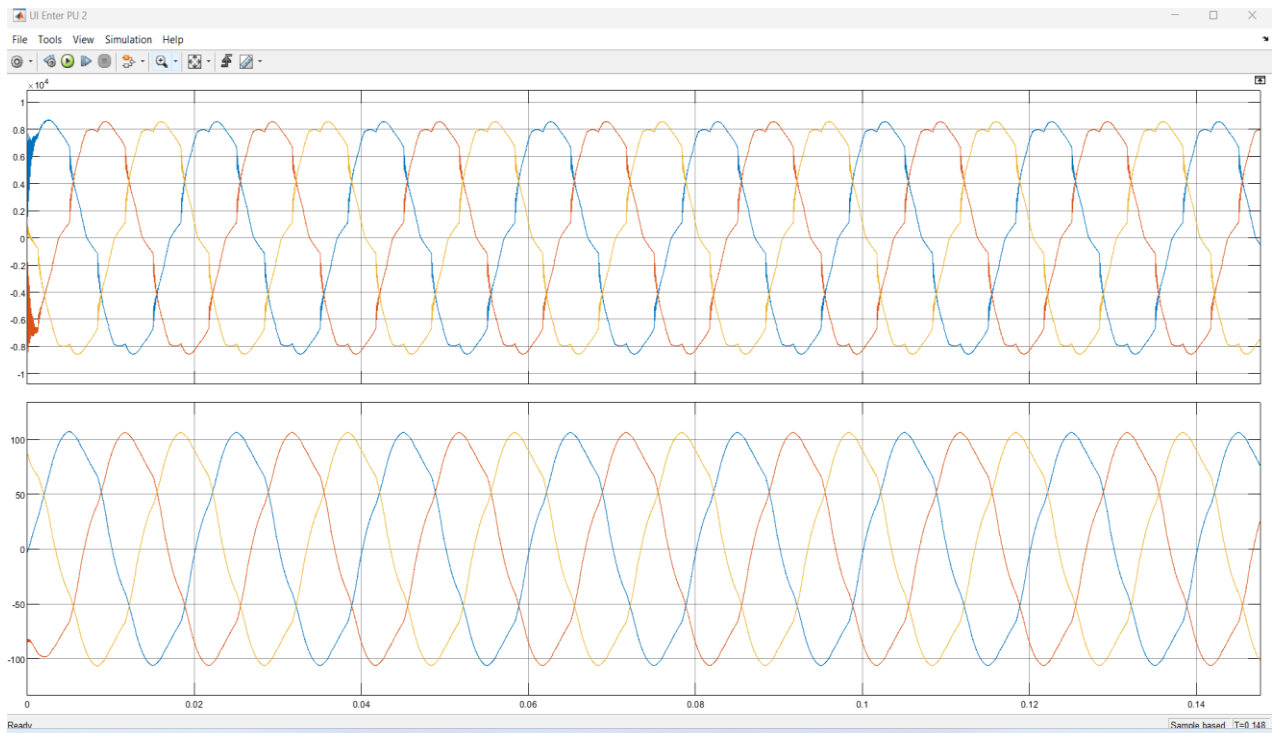


Рисунок П.7.9 - Осциллограммы напряжения и тока до подключения ФКУ на вводе проходческого участка 2

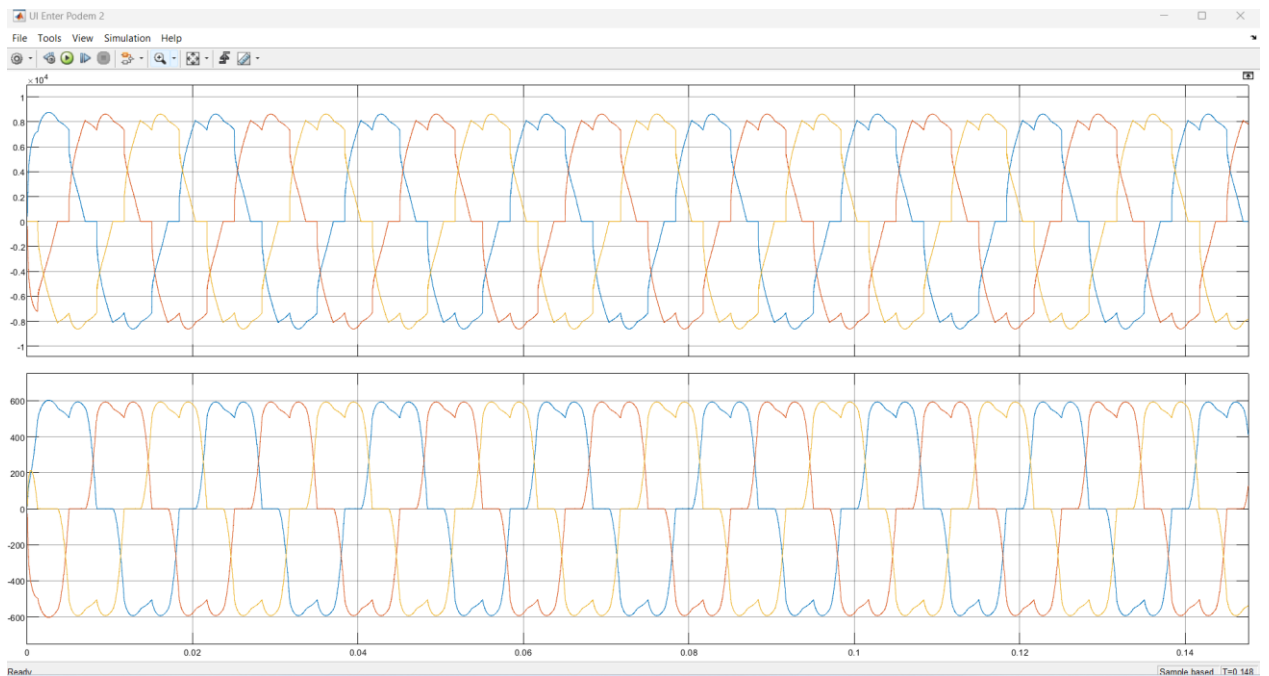
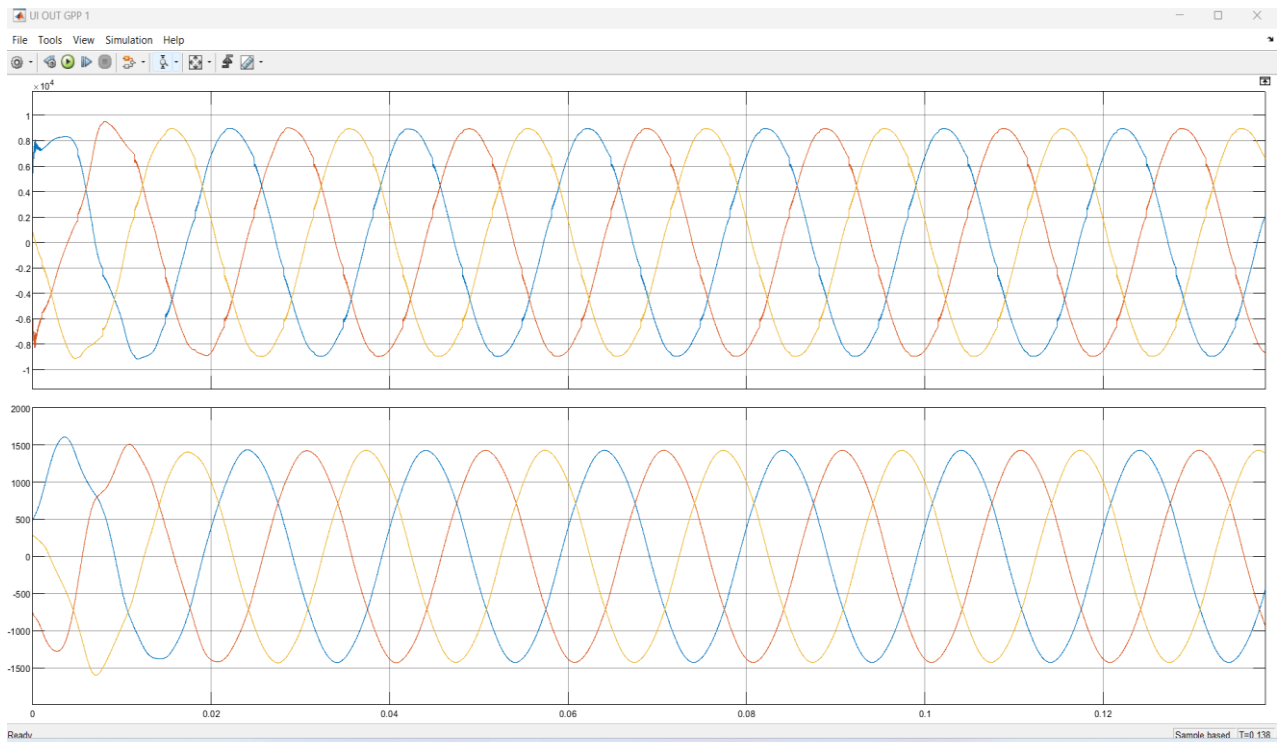
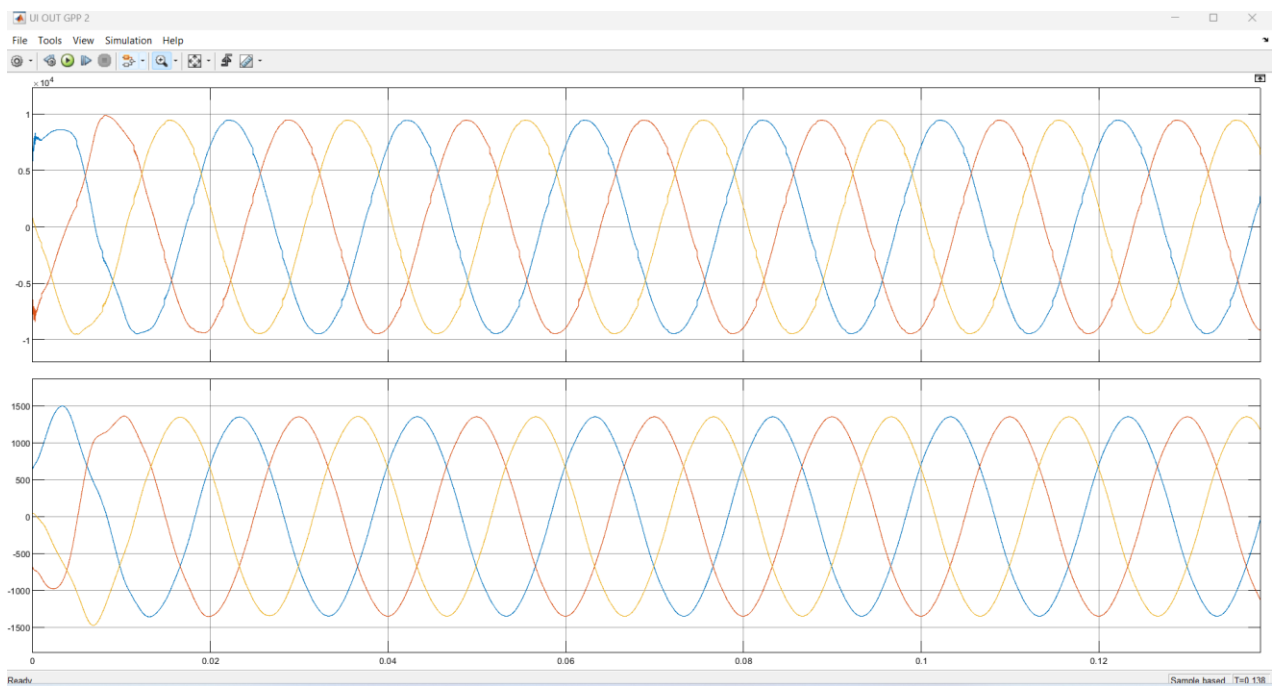


Рисунок П.7.10 - Осциллограммы напряжения и тока до подключения ФКУ на вводе подъемной установки 2



**Рисунок П.7.11 - Осциллограммы напряжения и тока после подключения
ФКУ на шинах ГПП (секция 1)**



**Рисунок П.7.12 - Осциллограммы напряжения и тока после подключения
ФКУ на шинах ГПП (секция 2)**

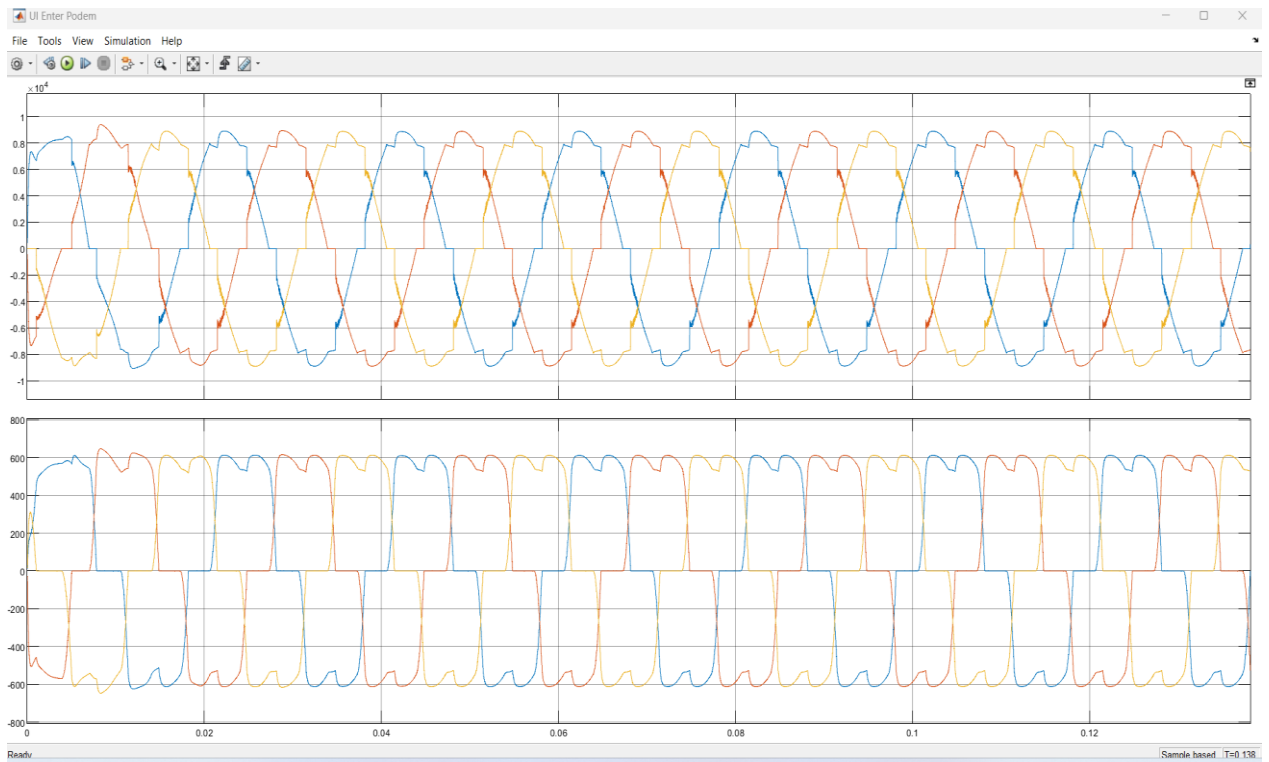


Рисунок П.7.13 - Осциллограммы напряжения и тока после подключения ФКУ на вводе подъемной установки 1

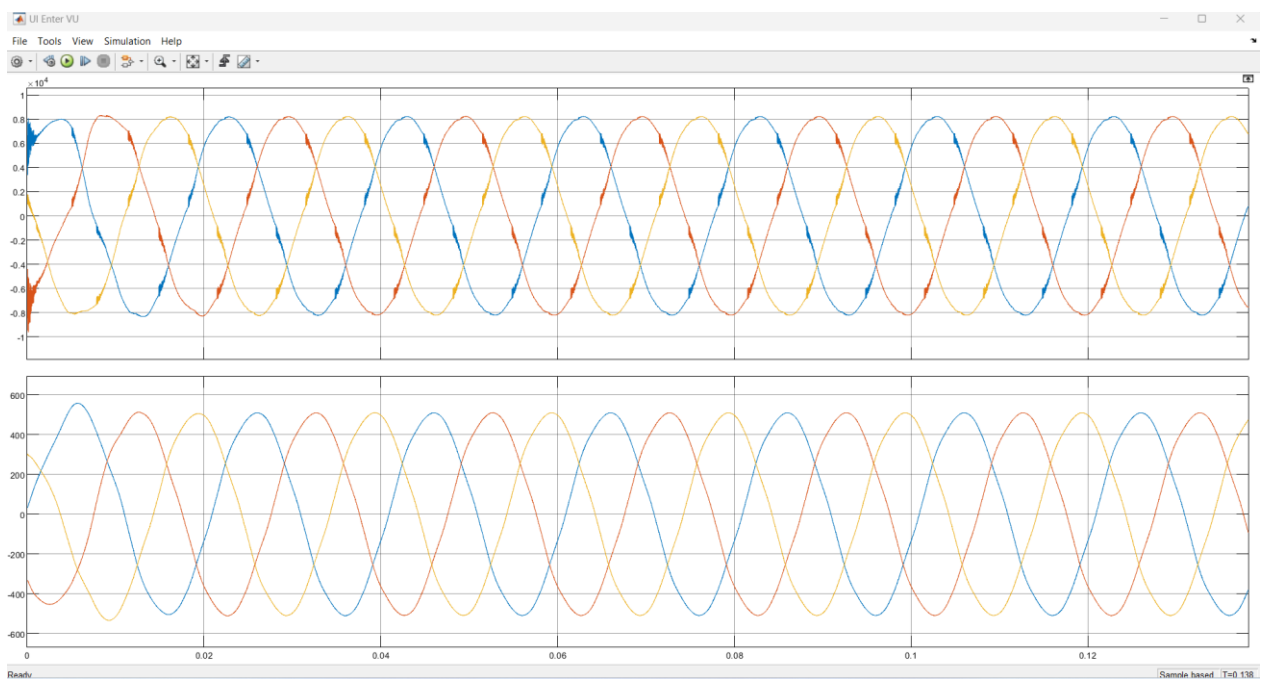


Рисунок П.7.14 - Осциллограммы напряжения и тока после подключения ФКУ на вводе выемочного участка

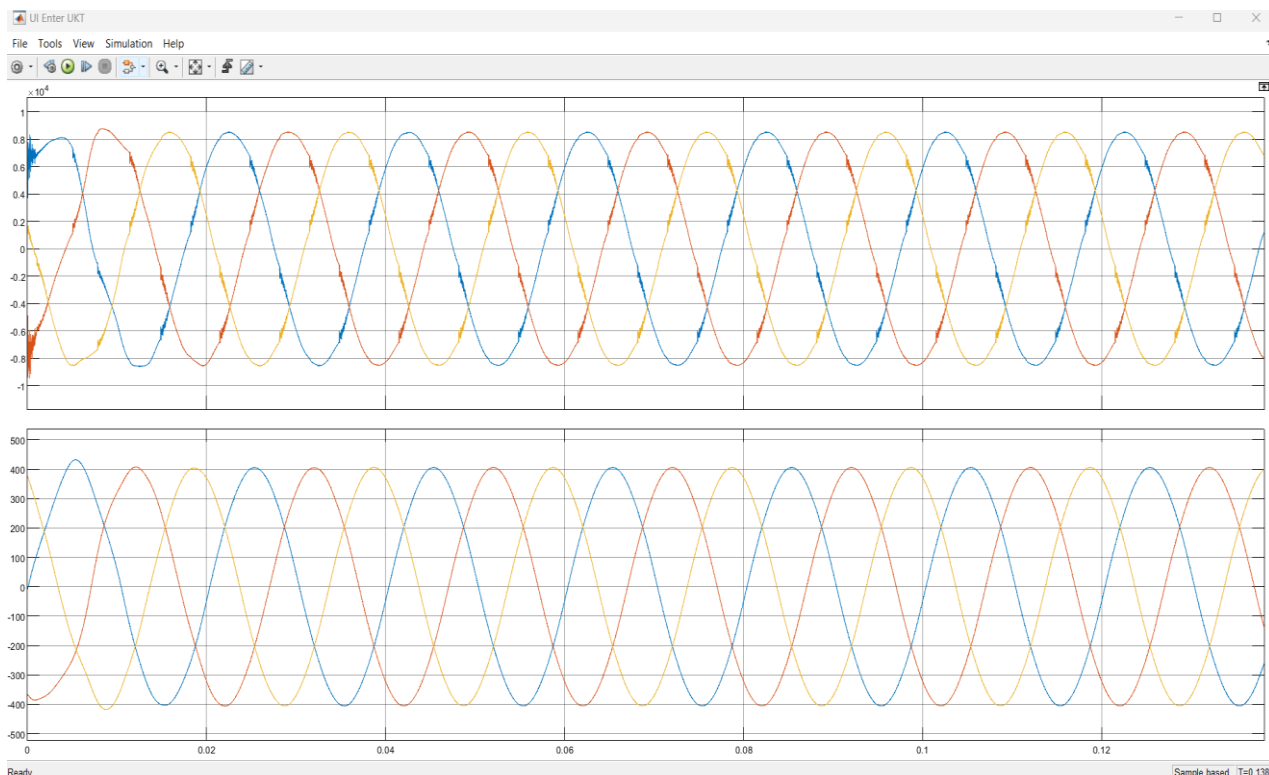


Рисунок П.7.15 - Осциллограммы напряжения и тока после подключения ФКУ на вводе участка конвейерного транспорта

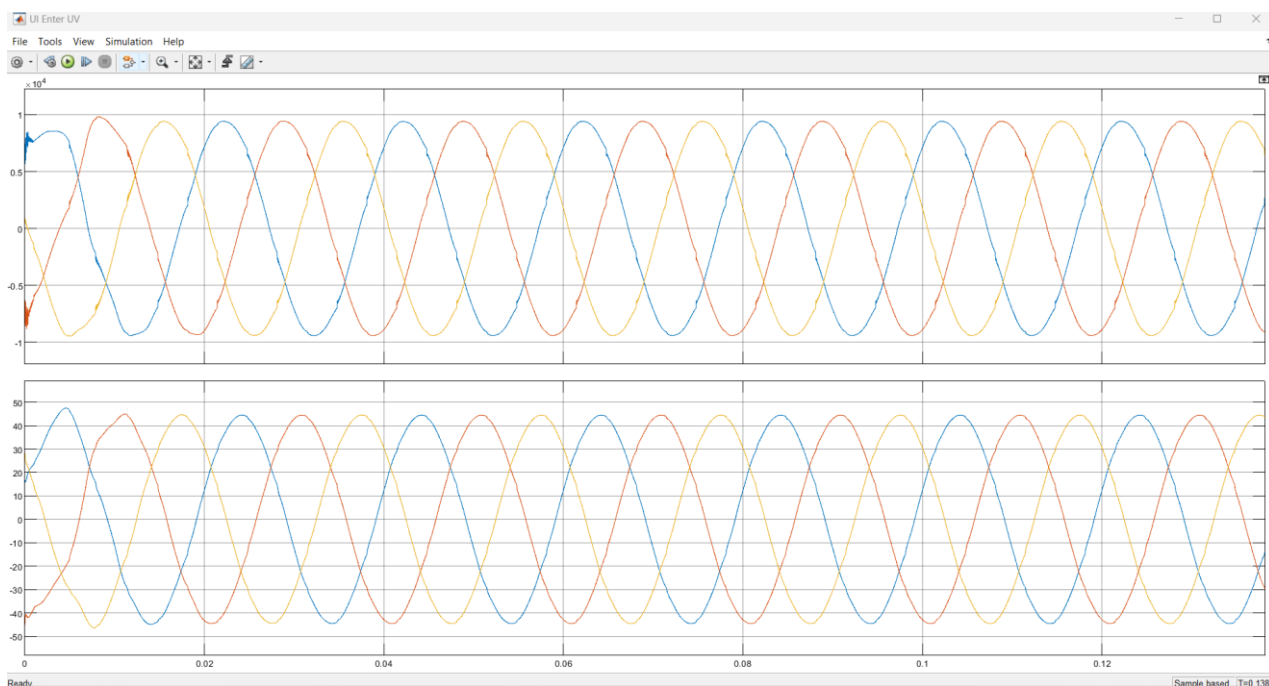


Рисунок П.7.16 - Осциллограммы напряжения и тока после подключения ФКУ на вводе участка водоотлива

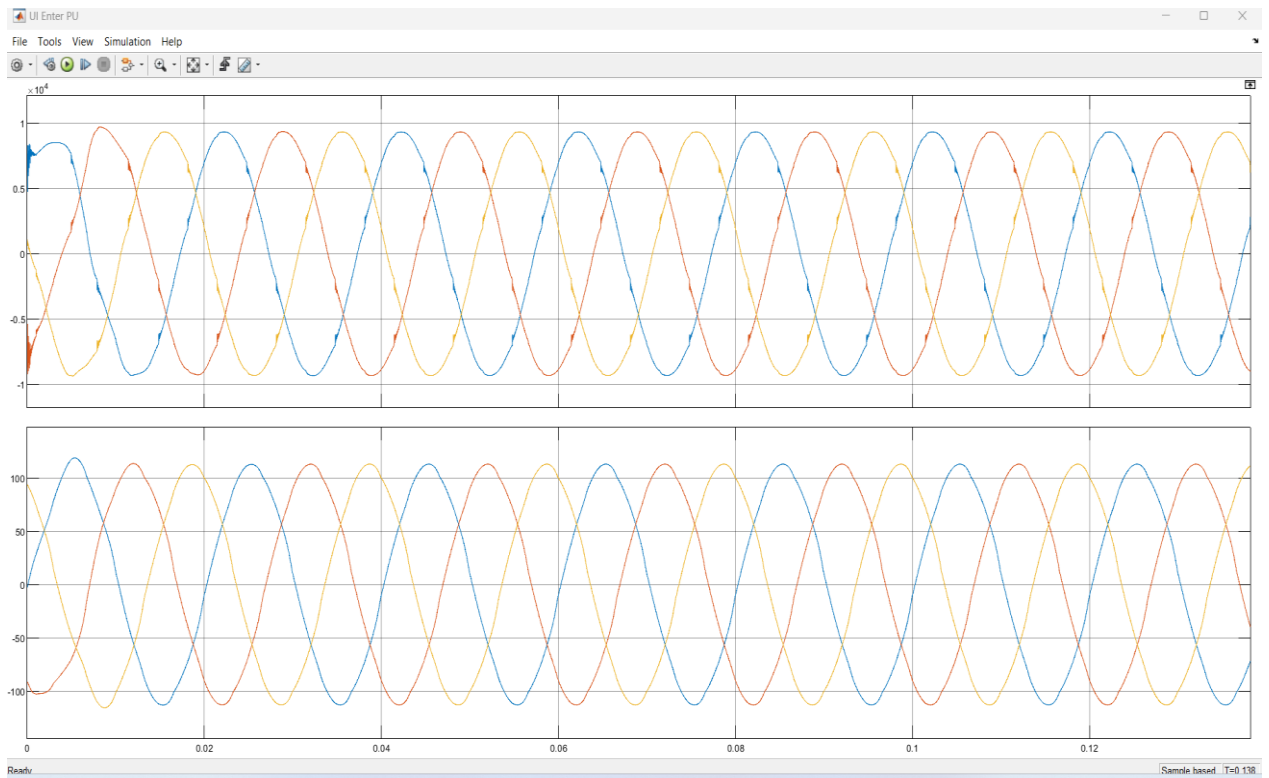


Рисунок П.7.17 - Осциллограммы напряжения и тока после подключения ФКУ на вводе проходческого участка 1

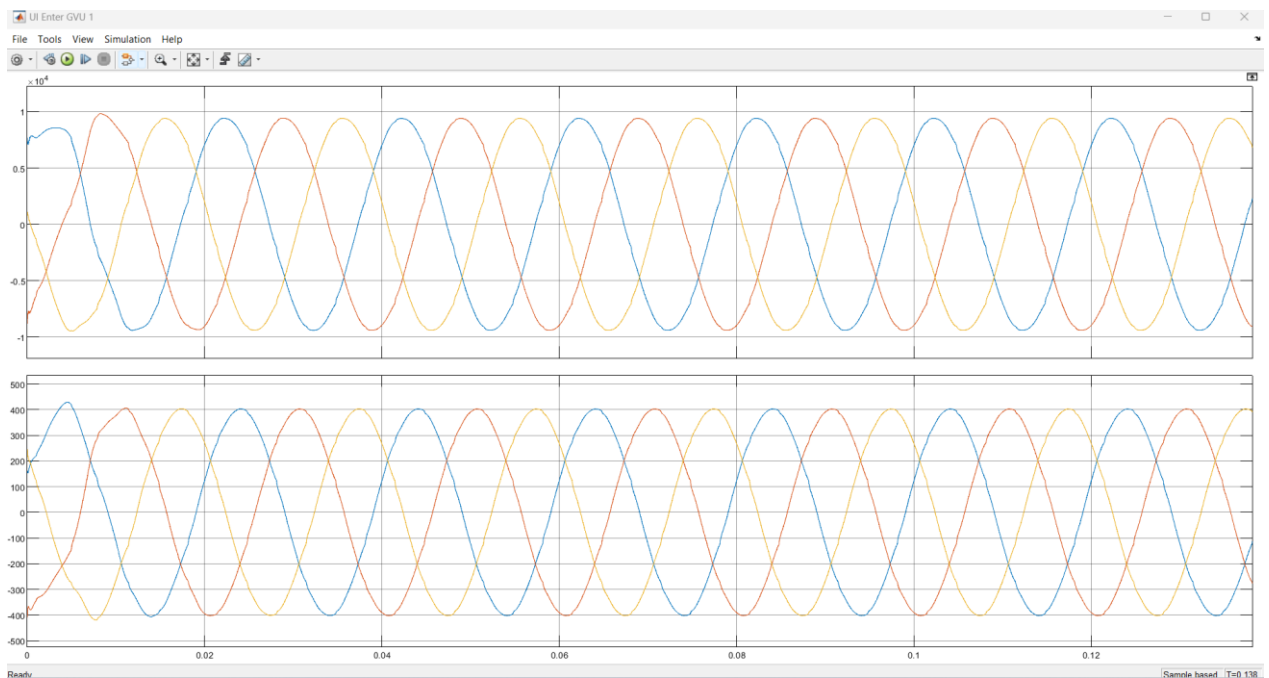


Рисунок П.7.18 - Осциллограммы напряжения и тока после подключения ФКУ на вводе вентилятора главного проветривания

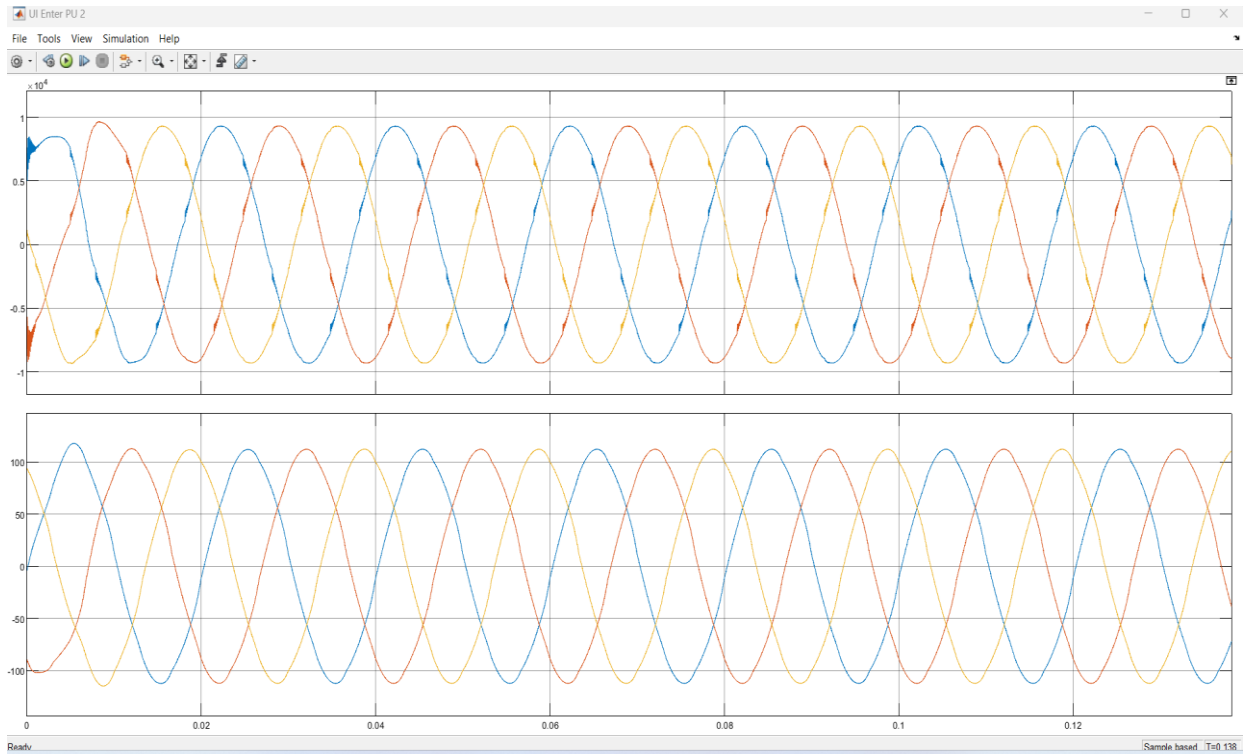


Рисунок П.7.19 - Осциллограммы напряжения и тока после подключения ФКУ на вводе проходческого участка 2

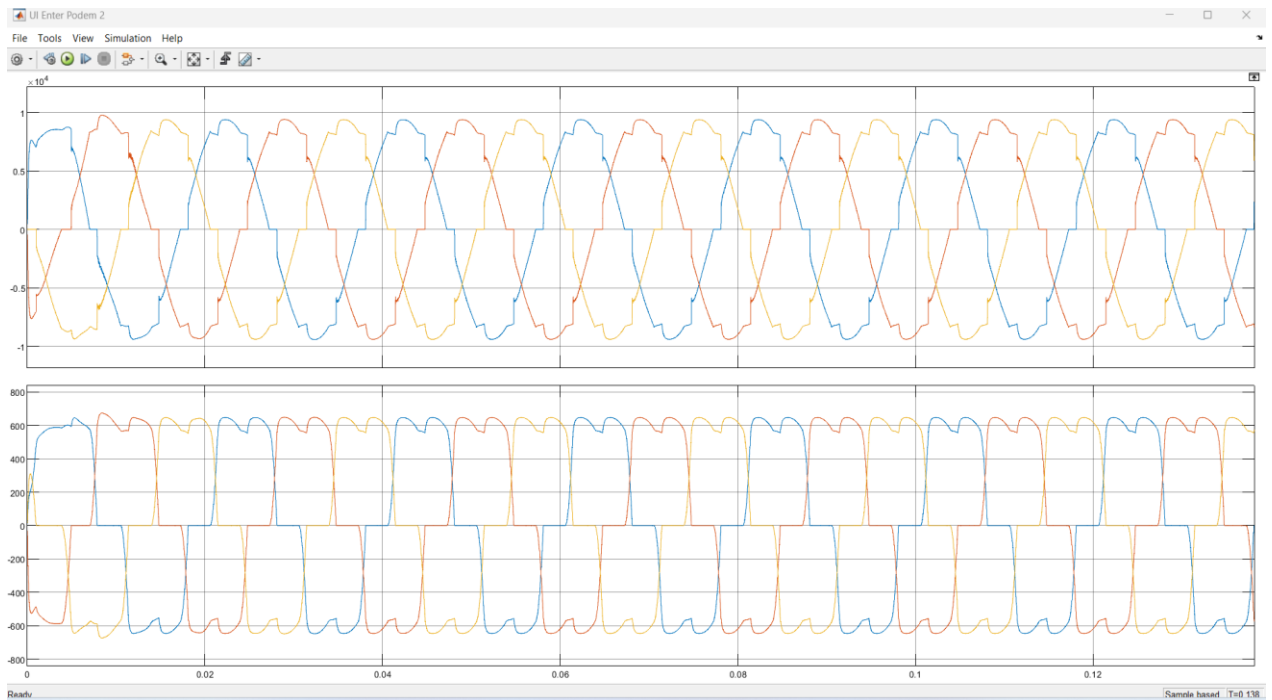


Рисунок П.7.20 - Осциллограммы напряжения и тока после подключения ФКУ на вводе подъемной установки 2

Приложение 8. Результаты внедрения





ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ
КОМПЛЕКСНОГО ОСВОЕНИЯ НЕДР
ИМ. АКАДЕМИКА Н.В. МЕЛЬНИКОВА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИПКОН РАН)

Крюковский тупик, д. 4, Москва, 111020
Тел.: +7 (495) 360-89-60; Эл. почта: ipkon-dir@ipkonran.ru
www.ipkonran.ru; www.ipkonran.ru
ОГРН 1037700121150; ИНН 7722013467; КПП 772201001

20.08.2024 № 117-01-05/124

На

№

СПРАВКА

об использовании результатов диссертационной работы Решетняка Сергея Николаевича на тему: «Закономерности влияния качества электроэнергии на эффективность функционирования электротехнических систем угольных шахт», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.4.2 Электротехнические комплексы и системы

Одним из направлений повышения функционирования угольных шахт является повышение энергоэффективности электротехнических комплексов и систем. В диссертационной работе, на основе теоретических и экспериментальных исследований, разработана методология исследования режимов работы электротехнических комплексов и систем угольных шахт; предложены эффективные режимы работы электромеханических комплексов на примере шахтных подъемных установок и электротехнических систем на примере систем электроснабжения; методы и средства повышения качества электрической энергии применительно к условиям выемочных участков угольных шахт высокой производительности.

Разработанные в диссертационной работе решения по эффективным режимам работы электромеханических комплексов и электротехнических систем, а также методы и средства повышения качества электрической энергии использованы при разработке рекомендаций по повышению эффективности функционирования электротехнических систем высокопроизводительных угольных шахт, занимающихся подземной разработкой газоносных угольных месторождений и внедрены на ряде предприятий угольной отрасли.

Директор ИПКОН РАН,
Академик РАН




В.Н. Захаров



Акционерное общество «Русский Уголь»
ул. Петровка, дом 10, 4 этаж, комнаты 1-13,
Москва, 107031
Тел./Факс: (495) 225-25-05
e-mail: reception@ruscoal.ru; www.ruscoal.ru
ОКПО 78465421, ОГРН 1097746061390
ИНН 7705880068, КПП 770701001

Иск. № 845 от «06» апреля 2023 г.

На № ___ от «_» _____ 2023 г.

Справка по результатам работы Решетняка С.Н.

СПРАВКА

об использовании результатов диссертационной работы Решетняка Сергея Николаевича на тему: «Совершенствование методов и средств повышения эффективности функционирования электротехнических систем угольных шахт», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.4.2 «Электротехнические комплексы и системы».

Одним из направлений повышения функционирования угольных шахт является повышение энергоэффективности электротехнических комплексов и систем. В диссертационной работе на основе теоретических и экспериментальных исследований разработана: методология исследования режимов работы электротехнических комплексов и систем угольных шахт; предложены эффективные режимы работы электромеханических комплексов (на примере шахтных подъемных установок), электротехнических систем (на примере систем электроснабжения); методы и средства повышения качества электрической энергии с учетом условий выемочных участков угольных шахт высокой производительности.

Полученные в диссертационной работе научно-технические решения по эффективным режимам работы электромеханических комплексов и электротехнических систем, усовершенствованные методы, а также разработанные средства повышения качества электрической энергии использованы в рекомендациях по повышению эффективности функционирования электротехнических систем высокопроизводительных угольных шахт и внедрены на ряде предприятий угольной отрасли.

Заместитель генерального директора
по производственно-техническим вопросам,
к.т.н.

С.В. Ясюченя

Сидоров В. В
31-82

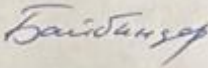
УТВЕРЖДАЮ
Директор шахты Саранская
АО «Арселормиттал Темиртау»
Угольный департамент г. Караганда
Шнель В.И.
« » 20 год

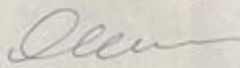
АКТ

внедрения результатов диссертационной работы доц., к.т.н. **РЕШЕТНЯКА СЕРГЕЯ НИКОЛАЕВИЧА** на тему: **Закономерности влияния качества электроэнергии на эффективность функционирования электротехнических систем угольных шахт»** представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.4.2 «Электротехнические комплексы и системы»


Мы, подписавшиеся Директор шахты Саранская Шнель В.И., Главный инженер шахты Саранская Баймиллер С.В., Главный энергетик шахты Саранская Майер В.И., составили настоящий акт о внедрении результатов диссертационной работы Решетняка С.Н., в виде: Методики имитационного моделирования систем электроснабжения угольных шахт высокой производительности, утвержденной Проректором по науке и инновациям НИТУ МИСИС проф., д.т.н. Филоновым М.Р.; Методики имитационного моделирования систем электроснабжения угольных шахт высокой производительности, утвержденной Проректором по науке и инновациям НИТУ МИСИС проф., д.т.н. Филоновым М.Р.; Рекомендаций по обеспечению качества электроэнергии для повышения эффективности функционирования электротехнических систем угольных шахт, в том числе опасных по внезапным выбросам газа и пыли, утвержденных Проректором по науке и инновациям НИТУ МИСИС проф., д.т.н. Филоновым М.Р., имеющих научную и практическую значимость, на угольной шахте Саранская АО «Арселормиттал Темиртау», Угольного департамента, г. Караганда, Республика Казахстан.

Внедрение указанных документов позволит повысить эффективность функционирования электротехнических систем при добыче угля подземным способом в условиях Карагандинского угольного бассейна.

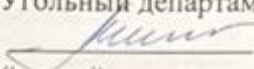
Главный инженер шахты Саранская  Баймиллер С.В.

Главный энергетик шахты Саранская  Майер В.И.

Подписи: Шнель В.И., Баймиллер С.В., Майер В.И. подтверждаю

Начальник отдела кадров шахты Саранская  Долгая Г.Н.

20 год

УТВЕРЖДАЮ
Директор шахты им. Костенко
АО «Арселормиттал Темиртау»
Угольный департамент г. Караганда
 Мустивко С.И.
« » 20 год

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы доц., к.т.н. **РЕШЕТНЯКА СЕРГЕЯ НИКОЛАЕВИЧА** на тему: «Закономерности влияния качества электроэнергии на эффективность функционирования электротехнических систем угольных шахт» представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.4.2 «Электротехнические комплексы и системы»

Комиссия в составе:

Директор шахты им. Костенко Мустивко С.И.;

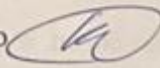
Главный инженер шахты им. Костенко Кенжигузинов М.К.;

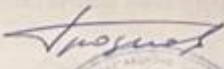
Главный энергетик шахты им. Костенко Грознов Н.Н.;

рассмотрела диссертационную работу доц., к.т.н. Решетняка С.Н. и разработанные на ее основе методики:

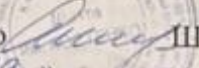
- имитационного моделирования СЭС высокопроизводительных участков угольных шахт для исследования ПКЭ;
- имитационного моделирования СЭС угольных шахт высокой производительности;

пришла к заключению о необходимости внедрения приведенных методик на угольной шахте им. Костенко АО «Арселормиттал Темиртау», Угольного департамента, г. Караганда, Республики Казахстан с целью повышения эффективности функционирования электротехнических систем.

Главный инженер шахты им. Костенко  Кенжигузинов М.К.

Главный энергетик шахты им. Костенко  Грознов Н.Н.

Подписи: Мустивко С.И., Кенжигузинова М.К., Грознова Н.Н. подтверждаю

Начальник отдела кадров шахты им. Костенко  Шайкина Г.В.

«19» апреля 2023 год

УТВЕРЖДАЮ
Директор шахты им. Кузембаева
АО «QARMET»
Угольный департамент г. Караганда
Потемкин Потемкин С.П.
« » 20 год

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы доц., к.т.н. **РЕШЕТНЯКА СЕРГЕЯ НИКОЛАЕВИЧА** на тему: «Закономерности влияния качества электроэнергии на эффективность функционирования электротехнических систем угольных шахт» представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.4.2 «Электротехнические комплексы и системы»

Комиссия в составе:

Директор шахты им. Кузембаева Потемкин С.П.;

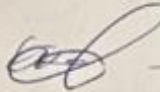
Главный инженер шахты им. Кузембаева Перебелин А.С.;

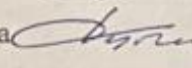
Главный энергетик шахты им. Кузембаева Дубин Р.Н.

рассмотрела диссертационную работу доц., к.т.н. Решетняка С.Н. и разработанные на ее основе:

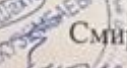
- Рекомендаций по обеспечению качества электроэнергии для повышения эффективности функционирования электротехнических систем угольных шахт.

Комиссия пришла к заключению о необходимости внедрения представленных рекомендаций, имеющих научную и практическую значимость, на угольной шахте им. Кузембаева АО «QARMET», Угольного департамента, г. Караганда, Республики Казахстан с целью повышения уровня эффективности функционирования электротехнических комплексов и систем.

Главный инженер шахты им. Кузембаева  — Перебелин А.С.

Главный энергетик шахты им. Кузембаева  Дубин Р.Н.

Подписи: Потемкина С.П., Перебелина А.С., Дубина Р.Н. подтверждаю

Начальник отдела кадров шахты им. Кузембаева  Смирнова В.В.

« » 2023 год



УТВЕРЖДАЮ
Проректор по образованию
НИТУ МИСИС



(Подпись руководителя организации)

А.А. Волков

СПРАВКА

о внедрении результатов диссертационного исследования
в учебный процесс

Результаты диссертационной работе **Решетника Сергея Николаевича** на тему: **«Совершенствование методов и средств повышения эффективности функционирования электротехнических систем угольных шахт»** внедрены в учебный процесс подготовки студентов по направлениям: 13.03.02 направление «Электроэнергетика и электротехника» - образовательный трек «Управление энергетическими ресурсами предприятий» в дисциплине «Электроснабжение»; 21.05.04 направление «Горное дело» образовательный трек «Электротехнические системы, машины и оборудование горных предприятий» в дисциплинах: «Электроснабжение горных предприятий», «Теория автоматического управления».

И.о. заведующего кафедрой «Энергетики
и энергоэффективности горной
промышленности» НИТУ МИСИС, к.т.н.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Кутев'.

Кутепов А.Г.



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ КОМПЛЕКСНОГО ОСВОЕНИЯ НЕДР
ИМ. АКАДЕМИКА Н.В. МЕЛЬНИКОВА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИПКОН РАН)



Утверждаю
Директор ИПКОН РАН
академик РАН

В.Н. Захаров
" " " 2024 г.

ПРОТОКОЛ

расширенного семинара отдела №2
ИПКОН РАН
от 14 мая 2024 г.

Присутствовали:

зам. директора ИПКОН РАН, докт. техн. наук Федотенко В.С.
зам. директора ИПКОН РАН, канд. техн. наук Шляпин А.В.
ученый секретарь ИПКОН РАН, проф., докт. техн. наук Кубрин С.С.;
гл. научн. сотрудник, докт. техн. наук Малинникова О.Н.;
гл. научн. сотрудник, докт. техн. наук Трофимов В.А.;
гл. научн. сотрудник, проф., докт. техн. наук Калабин Г.В.
гл. научн. сотрудник, проф., докт. техн. наук Галченко Ю.П.
зав. отделом, проф., докт. техн. наук Дмитрак Ю.В.
зав. отделом, канд. техн. наук Федоров Е.В.
вед. научн. сотрудник, докт. техн. наук Закоршменный И.М.
вед. научн. сотрудник, докт. техн. наук Клочев Р.В.
вед. научн. сотрудник, докт. техн. наук Атрушкевич В.А.
вед. научн. сотрудник, докт. техн. наук Бунин И.Ж.
вед. научн. сотрудник, проф., докт. техн. наук Бобин В.А.;
вед. научн. сотрудник, докт. техн. наук Кулибаба С.Б.
ст. научн. сотрудник, канд. техн. наук Шиповский И.Е.
ст. научн. сотрудник, доц., канд. техн. наук Харченко А.В.
ст. научн. сотрудник, доц., канд. техн. наук Решетняк С.Н.;
ст. научн. сотрудник, доц., канд. техн. наук Блохин Д.И.;

Слушали: Доклад старшего научного сотрудника, доцента, канд. техн. наук Решетняка Сергея Николаевича о представленной диссертационной работе «Закономерности влияния качества электроэнергии на эффективность функционирования электротехнических систем угольных шахт» на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.4.2 – «Электротехнические комплексы и системы».

Диссертационная работа структурно состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературных источников, приложений изложенных на ___ стр.

В диссертационной работе обоснованы актуальность, цели и задачи диссертационного исследования. Выполнены: обзор исследования состояние эффективности функционирования электротехнических систем угольных шахт; исследование показателей качества электрической энергии в системе электроснабжения угольных шахт; синтез моделей и исследование режимов генерации высших гармонических составляющих потребителями электроэнергии с преобразовательной нагрузкой; анализ режимов работы и обоснование параметров активного фильтра высших гармоник для повышения качества электрической энергии в подземных сетях угольных шахт; анализ режимов работы и обоснование параметров фильтров высших гармоник для повышения качества электрической энергии в системах электроснабжения поверхностного комплекса угольных шахт; разработка рекомендаций и технических решений по повышению эффективности функционирования электротехнических систем угольных шахт.

По результатам исследований сформулированы научные положения выносимые на защиту, с отражением их научной новизны, достоверности результатов исследований, теоретической и практической значимости.

Научные и практические результаты диссертационного исследования достаточно полно отражены в 46-ти публикациях, из которых: из которых 15 опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК РФ (по номеру специальности), 12 опубликованы в журналах, реферируемых в базе Scopus, 1 патент на полезную модель. Результаты исследований прошли широкую апробацию на многочисленных научных международных и отечественных симпозиумах и конференциях.

Вопросы задали: зам. директора ИПКОН РАН, докт. техн. наук Федотенко В.С.; ученый секретарь ИПКОН РАН, проф., докт. техн. наук Кубрин С.С.; гл. научн. сотрудник, докт. техн. наук Малинникова О.Н.; гл. научн. сотрудник, проф., докт. техн. наук Калабин Г.В.; гл. научн. сотрудник, докт. техн. наук Гальченко Ю.П.; зав. отделом, докт. техн. наук Дмитрак Ю.В.; вед. научн. сотрудник, докт. техн. наук Клюев Р.В.; вед. научн. сотрудник, докт. техн. наук Бунин И.Ж.; вед. научн. сотрудник, проф., докт. техн. наук Бобин В.А..

Общее количество заданных вопросов – 32.

На все вопросы были получены исчерпывающие ответы.

Выступили: зам. директора ИПКОН РАН, докт. техн. наук Федотенко В.С.; ученый секретарь ИПКОН РАН, проф., докт. техн. наук Кубрин С.С.; гл. научн. сотрудник, докт. техн. наук Малинникова О.Н.; гл. научн. сотрудник, проф., докт. техн. наук Калабин Г.В.; гл. научн. сотрудник, докт. техн. наук Гальченко Ю.П.; зав. отделом, докт. техн. наук Дмитрак Ю.В.; вед. научн. сотрудник, докт. техн. наук Клюев Р.В.; вед. научн. сотрудник, докт. техн. наук Бунин И.Ж.; вед. научн. сотрудник, проф., докт. техн. наук Бобин В.А..

Выступающие отметили актуальность, научную и практическую значимость результатов исследований для повышения функционирования электротехнических систем угольных шахт.

Постановили:

Диссертационная работа Решетняка Сергея Николаевича «Закономерности влияния качества электроэнергии на эффективность функционирования электротехнических систем угольных шахт», представленная на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.4.2 – «Электротехнические комплексы и системы», является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований изложены новые научно обоснованные технические решения, внедрение которых вносит значительных вклад в развитие угольной отрасли страны.

Председатель семинара,
Ученый секретарь ИПКОН РАН, проф., д.т.н



Кубрин С.С.