

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС»**

На правах рукописи

РЕШЕТНЯК Мария Юрьевна

**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В
ПОДЗЕМНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ
ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ УГОЛЬНЫХ ШАХТ**

2.4.2 – «Электротехнические комплексы и системы»

отрасль науки (шифр и наименование научной специальности)

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель - канд. техн. наук, профессор

Плащанский Л.А.

Москва - 2022

Содержание

	Стр.
Введение	4
Глава 1. Анализ состояния вопроса и обоснование задачи исследования	8
1.1 Обзор исследований качества электроэнергии в электрических сетях горных предприятий	8
1.2 Влияние показателей качества электроэнергии на функционирование подземных электрических сетей	12
1.3 Постановка задач исследования	21
Глава 2. Экспериментальные исследования и анализ качества электроэнергии в электрических сетях высокопроизводительных угольных шахт	23
2.1 Общая характеристика шахтных электрических сетей	23
2.2 Методика экспериментальных исследований показателей качества электрической энергии	29
2.3 Экспериментальные исследования и анализ качества электроэнергии в электрических сетях на поверхности шахт	37
2.4 Экспериментальные исследования и анализ качества электроэнергии в подземных электрических сетях выемочных участков	51
2.5 Выводы	57
Глава 3. Синтез технических устройств для повышения качества электрической энергии в условиях в условиях шахт высокой производительности	58
3.1 Обоснование применения технических устройств для повышения качества электрической энергии	58
3.2 Синтез параметров активных фильтров высших гармоник применительно к условиям высокопроизводительных угольных шахт	64
3.3 Выводы	76
Глава 4. Исследование качества электрической энергии в подземных сетях угольных шахт с применением активных фильтров высших гармоник	77
4.1 Методика моделирования системы электроснабжения высокопроизводительных участков угольных шахт	77
4.2 Моделирование системы электроснабжения выемочного участка с учетом гармонического состава сети	83
4.3 Моделирование системы электроснабжения выемочных участков с устройством повышения качества электрической энергии	88
4.4 Анализ результатов моделирования системы электроснабжения выемочных участков с учетом гармонического состава сети	93
4.5 Выводы	110

Глава 5. Рекомендации и техническое устройство по повышению показателей качества электрической энергии в подземных электрических сетях угольных шахт	111
5.1 Методическое обоснование структуры устройства автоматизированного мониторинга показателей качества электроэнергии	111
5.2 Обоснование местоположения устройства повышения качества электрической энергии в условиях воспроизводительных угольных шахт	115
5.3 Техничко-экономическая оценка применения устройства контроля и повышения уровня качества электрической энергии	123
5.4 Выводы	125
Заключение	126
Литература	128
Приложения	142

Введение

Актуальность работы. Одним из основных условий эффективного функционирования системы электроснабжения высокопроизводительных угольных шахт является бесперебойное питание подземных потребителей технологического процесса электроэнергией с соблюдением показателей ее качества.

Технологический процесс современных угольных шахт характерен специфической системой разработки (лава – пласт, лава – шахта) с длиной лавы от 300 метров и суточной производительности от 10000 тонн. Это обеспечивается современными высокопроизводительными выемочными комплексами с цифровыми телеметрическими системами управления, защиты и блокировки. Указанные комплексы используют различные системы электроприводов с широким применением регулируемых на базе полупроводниковых преобразовательных устройств.

Широкое применение преобразовательных устройств обуславливает возникновение высших гармоник в подземных электрических сетях с постоянно меняющимся спектром, определяющих отклонение показателей качества электроэнергии от регламентируемых, что вызывает повышенный нагрев электродвигателей, силовых трансформаторов, кабелей, а также сбои в работе микропроцессорных устройств управления и защиты. Значительный рост мощностей и характер ведения горных работ вызвал необходимость повышения напряжения распределительных сетей до 3300 В. Особенно это опасно для специфическими условий угольных шахт при эксплуатации силового электрооборудования и аппаратуры управления.

Непрерывность функционирования систем подземного электроснабжения не допускает перерывов, несоблюдения качества электроэнергии, ложных срабатываний под воздействием всевозможных факторов, поскольку это связано с большим ущербом, а технологический процесс не предусматривает внеплановых отключений.

В соответствии с изложенным тема диссертационной работы, направленная на обоснование и разработку мероприятий по повышению качества электрической энергии в подземных электрических сетях угольных шахт, является актуальной.

Степень разработанности темы исследования.

Существенный вклад в развитие теории электромагнитной совместимости, в частности повышения качества электрической энергии в условиях промышленных предприятий, внесли следующие ученые: Б.Н. Абрамович, Дж. Арриллаги, Д. Бредли, А.В. Грин, М.С. Ершов, И.В. Жежеленко, В.Г. Курбацкий, Л.А. Кучумов, В.Я. Майер, Г.А. Николаев, Н.А. Нойбергер, В.А. Пономарев, Г.Г. Пивняк, А.В. Праховник, Ю.Л. Саенко, Ю.А. Сычев, Ю.В. Шевырёв, А.К. Шидловский, А.А. Яценко и др. Довольно детально вопросы электромагнитной совместимости рассмотрены для предприятий минерально-сырьевого комплекса (открытые горные работы, добыча нефте-газового сырья), а также для обогатительных фабрик. Однако исследования электромагнитной совместимости в условиях подземных электрических сетей угольных шахт высокой производительности, в том числе шахт опасных по внезапным выбросам газа и пыли, практически отсутствуют несмотря на широкое применение регулируемых электроприводов для подземных электроустановок.

Целью диссертационной работы является повышение показателей качества электрической энергии в подземных сетях до нормативных значений путем ограничения влияния высших гармоник.

Идея работы состоит в повышении качества электроэнергии в подземных электрических сетях высокопроизводительных угольных шахт на основе мониторинга показателей качества электроэнергии и их анализа для обеспечения нормативных значений.

Объектом исследования диссертационной работы являются подземные электрические сети высокопроизводительных угольных шахт.

Предметом исследования является гармонический состав электроэнергии подземных электрических сетей угольных шахт и задачи, связанные с появлением высших гармоник.

Основные задачи исследования:

1. Структурный анализ электрооборудования и электрических сетей высокопроизводительных угольных шахт с целью выявления источников высших гармоник, оказывающих негативное влияние на их работу;
2. Экспериментальное исследование и анализ гармонического состава электроэнергии в электрических сетях высокопроизводительных угольных шахт для обоснования повышения показателей качества электроэнергии;
3. Анализ схемных решений активных фильтров высших гармоник для синтеза устройства мониторинга и ограничения влияния высших гармоник в подземных электрических сетях угольных шахт высокой производительности;
4. Моделирование системы электроснабжения выемочного участка высокопроизводительной угольной шахты с целью выявления гармонического состава;
5. Обоснование структурной схемы устройства автоматизированного мониторинга гармонического состава подземных электрических сетей высокопроизводительных угольных шахт.

Научная новизна работы:

- впервые получены аналитические выражения, позволяющие определить величину накопительной емкости конденсатора и индуктивности входного дросселя активного фильтра высших гармоник в зависимости от напряжения и мощности электрооборудования, характерных для подземных электрических сетей высокопроизводительных угольных шахт;
- синтезирована имитационная модель системы электроснабжения с распределенными источниками питания для оценки гармонического состава электрической энергии, что характерно для выемочных участков высокопроизводительных угольных шахт;

- обоснованы параметры активного фильтра высших гармоник с параллельным подключением и ёмкостным накопителем, положенным в основу устройства мониторинга показателей качества электроэнергии подземных электрических сетей для специфических условий высокопроизводительных угольных шахт.

Теоретическая и практическая значимость работы:

- методика имитационного моделирования системы электроснабжения высокопроизводительных участков угольных шахт рекомендуется для исследований в области повышения качества электроэнергии;
- структура устройства с параллельным подключением активного фильтра высших гармоник для автоматизированного мониторинга показателей качества электроэнергии (Патент на полезную модель №185421 от 04.12.2018 г.).
- для учебного процесса - при изложении вопросов повышения качества электрической энергии в цикле дисциплин «Электроснабжение».

Методология и методы исследования:

Для решения поставленных задач использованы методы расчета и моделирования электрических цепей, систем электроснабжения электротехнических комплексов горных предприятий, методы фазовых преобразований токов и напряжений. Экспериментальные исследования проводились с использованием методов имитационного моделирования в среде Matlab.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Аналитические выражения, позволяющие определить накопительную емкость конденсатора и индуктивность входного дросселя активного фильтра высших гармоник в зависимости от напряжения и мощности электрооборудования, характерных для подземных электрических сетей высокопроизводительных участков угольных шахт.
2. Имитационная модель системы электроснабжения и область ее моделирования, отличающаяся тем, что учитывает распределенный характер

источника питания для оценки гармонического состава электроэнергии электрических сетей в специфических условиях высокопроизводительных участков угольных шахт.

3. Обоснование параметров активного фильтр, положенного в основу устройства мониторинга показателей качества электроэнергии подземных электрических сетей в специфических условиях высокопроизводительных угольных шахт.

Степень достоверности подтверждается корректным использованием методов математического анализа, теории электроснабжения, методов имитационного моделирования, а также достаточной сходимостью результатов экспериментальных исследований и имитационного моделирования (погрешность не превышает 10 %).

Личный вклад автора.

Участие в постановке задач исследования, в сборе исходной информации и анализе систем электроснабжения и электрооборудования высокопроизводительных угольных шахт; в проведении экспериментальных исследований; в разработке имитационных моделей систем электроснабжения высокопроизводительных участков угольных шахт; реализации результатов работы.

Апробация работы. Основные положения и разделы диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных симпозиумах «Неделя горняка – 2018, 2019, 2020, 2022» (Москва 2018, 2019, 2020, 2022); на научных семинарах кафедры «Энергетика и энергоэффективность горной промышленности»; на Международной научной школе молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке – глазами молодых» (Москва, 2016); на 5 - ой Международном форуме «Энергоэффективность и энергосбережение. Развитие энергетики» (Москва, 2016); на Международной научно-технической конференции «Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий» (Уфа 2017, 2019); на Международной научно-практической конференции «Подземная угледобыча 21 век» (Ленинск-

Кузнецкий, 2018); на Международной конференции «Научные исследования стран ШОС: Синергия и интеграция» (Пекин, Китай, 2019).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 работ, из которых 7 опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 2 опубликованы в журналах из базы Scopus, 1 патент на полезную модель.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы из 122 наименований и приложений. Общий объем работы - 148 стр., включая 101 рисунок и 16 таблиц.

Глава 1. Анализ состояния вопроса и обоснование задачи исследования

1.1 Обзор исследований качества электроэнергии в электрических сетях горных предприятий

Исследованию вопросов эффективного использования электрической энергии в условиях угольных шахт посвящены работы таких ученых как Абрамович Б.Н., Бабокин Г.И., Беляк В.Л., Гладилин Л.В., Захарова А.Г., Ляхомский А.В., Миновский Ю.П., Озерной М.И., Пивняк Г.Г., Пугачев Е.В., Плащанский Л.А., Разгильдеев Г.И., Розен В.П., Серов В.И., Щуцкий В.И. и другие. В представленных работах исследованы вопросы рационального электроснабжения горных предприятий, необходимости применения электрооборудования специального исполнения, безопасной эксплуатации электрооборудования, электропотребления, прогнозирования, управления электрическими нагрузками, а также проведены связи между параметрами электропотребления и технологическими характеристиками как отдельных потребителей, так и предприятия в целом [1, 4, 5, 7, 9, 10, 11, 44, 64, 65, 66, 72, 75, 84, 110, 115, 117]. Однако ряд исследований был проведен достаточно давно и полученные результаты не могут быть корректными для современных угледобывающих предприятий. Это обусловлено достаточно бурным развитием техники и технологий при добыче угля подземным способом.

Исследованию вопросов повышения качества электроэнергии в электрических сетях посвящены работы таких ученых как Абрамович Б.Н., Арриллаги Дж., Бредли Д., Грин А.В., М.С. Ершов, Жежеленко И.В., Курбацкого В.Г., Кучумова Л.А., Майера В.Я., Николаева Г.А., Пономарева В.А., Пивняка Г.Г., Сычев Ю.А., Шевырева Ю.В., Яценко А.А. и др. Признанными научными авторитетами в области исследования гармонического состава сети, а также исследованию резонансных режимов в электрических сетях являются профессора Жежеленко И.В. и Пивняк Г.Г.. Именно в их научных трудах сформулированы основные положения теории исследования гармонического состава в электрических сетях [32, 33, 34, 35, 36,

37, 71, 72, 73, 118]. В частности, рассмотрены электромагнитные процессы, возникающие при этом помехи и возможности снижения их влияния на электрическую сеть в условиях общепромышленных предприятий, рассмотрен ряд аспектов экономического, экологического и юридического характера в области исследований качества электрической энергии. Однако следует отметить, что в представленных публикациях нет исследований параметров качества электрической энергии в специфических условиях подземных электрических сетей угольных шахт, в том числе опасных по внезапным выбросам газа и пыли.

В диссертационной работе Зарипова Ш.У., а также ряде публикаций рассмотрены вопросы повышения эффективности электроснабжения непрерывных технологических процессов гидрометаллургического производства [42, 43, 74, 75, 76]. В частности, в работе представлена математическая модель системы электроснабжения гидрометаллургического производства, позволяющая получить пространственную карту возникновения резонансных явлений с недопустимой перегрузкой, опасной для технологического оборудования [43]. Целью проведенных исследований было повышение эффективности электроснабжения непрерывных технологических процессов гидрометаллургического производства путем устранения высших гармоник, опасных для технологического оборудования. Учитывая отличие схем электроснабжения гидрометаллургического производства от схем электроснабжения угольных шахт, применение полученных результатов для условий угольных шахт, в том числе опасных по внезапным выбросам газа и пыли, невозможно.

В диссертационной работе Грина А.В. рассмотрены вопросы разработки фильтркомпенсирующих устройств для обеспечения электромагнитной совместимости в электротехнических комплексах с вентильной нагрузкой, применительно к условиям АО «Кандалакшский алюминиевый завод» [21]. В работе проведен анализ влияния различных преобразовательных устройств на питающую сеть, а также анализ пассивных фильтров высших гармоник.

Однако в работе предлагается установка фильтркомпенсирующих устройств на шинах главной понизительной подстанции, что в условиях современных угольных шахт является не достаточным.

Исследованиями уровней высших гармоник в условиях промышленных предприятий, а также разработкой силовых фильтров занимался ряд зарубежных специалистов, в частности Дж. Арриллагги, П. Бредли (Кентербирийский университет, Новая Зеландия), Д. Бредли (Лондонский университет, Великобритания) и другие. Ими проведены исследования высших гармоник в электрических сетях и создан математический аппарат, описывающий процесс их влияния на сеть и изложены способы снижения их до допустимых уровней [108, 109, 111, 112, 114, 121, 122]. Однако все эти исследования проведены в условиях общепромышленных предприятий.

В научной работе [120] приведены исследования качества электрической энергии для горных предприятий, и в частности, теоретические и экспериментальные исследования показателей качества электрической энергии в условиях обогатительных фабрик по переработке алмазоносных руд, а также рудников. Следует отметить, что все экспериментальные исследования осуществлялись на поверхности рудника, а в качестве объекта исследования выступает подъемная установка, что является весьма недостаточным для условий высокопроизводительных угольных шахт.

В диссертационной работе Беяка В.Л. научно обосновано повышение эффективности систем подземного электроснабжения высокопроизводительных угольных шахт за счет повышения уровня питающего напряжения [7]. В работе предложена математическая модель системы подземного электроснабжения высокопроизводительной угольной шахты при учете новых технологических решений (Лава – шахта, Лава – пласт). Также получен ряд аналитических зависимостей, позволяющий оптимизировать уровень питающего напряжения ряда современных подземных потребителей угольных шахт, в том числе опасных по внезапным выбросам газа и пыли [8, 9, 10, 11]. Проведённые исследования позволили

уменьшить потери в системе подземного электроснабжения за счет повышения уровня напряжения, однако в работе не ставилась задача по оценке влияния высших гармоник на работу основного технологического оборудования высокопроизводительных участков угольных шахт.

1.2 Влияние показателей качества электроэнергии на функционирование подземных электрических сетей

Основной энергетический ресурс, используемый в условиях подземных горных работ, а зачастую и единственный, является электрическая энергия [6, 44, 63, 85, 105]. В настоящее время проблеме качества электрической энергии в подземных электрических сетях горнодобывающих предприятий не уделяется достаточного внимания, однако значительный рост мощностей подземных потребителей, наряду со значительным числом преобразовательных устройств, служащих для регулирования частоты вращения электроприводов различных механизмов, делают повышение качества электрической энергии в этих сетях необходимым.

Под качеством электрической энергии понимают составляющую электромагнитной совместимости, характеризующую параметры электромагнитной среды. Электромагнитная совместимость предполагает способность электрооборудования функционировать в электромагнитной среде при номинальных режимах работы, не создавая недопустимых электромагнитных помех для другого оборудования, функционирующего в той же среде [15, 16, 22, 29, 39, 41, 54, 70, 97].

Повышение уровня электромагнитных помех, т.е. снижения качества электрической энергии, приводит к негативным последствиям электротехнического и технологического характера, к которым можно отнести:

- увеличение потерь активной и реактивной мощности;
- увеличение капитальных вложений при разработке системы электроснабжения (т.е. при проектировании системы электроснабжения необходимо завышать мощность для компенсации потерь активной и реактивной мощности);
- сокращение срока службы электрооборудования;

- изменение номинальных режимов работы электрооборудования, как следствие нарушение технологических параметров добычи полезного ископаемого (выход из строя оборудования, аварий, брак продукции, ложные срабатывания систем защит и т.д.) [12, 31, 34, 35, 38, 40, 45, 52, 58, 60, 61, 68, 94, 95, 102].

Исследованиями в области электромагнитной совместимости предложен ряд методов по оптимизации негативного влияния качества электрической энергии за счет пассивных и активных фильтров высших гармоник, а также гибридных фильтров [2, 3, 16, 21, 24, 25, 27, 28, 32, 33, 47, 49, 59, 75, 93, 99, 100, 103, 107, 114, 116, 122].

Следует отметить, что мероприятия, связанные с качеством электрической энергии, являются результатом стратегии развития горнодобывающей отрасли России, а угледобывающие предприятия непосредственно заинтересованы в реализации этих мероприятий [17, 18, 19, 53, 96].

При решении задачи по определению показателей качества электрической энергии в электрических сетях возможно применение нескольких способов. Первый - расчетный способ определения показателей, второй - с помощью технических измерительных устройств. Комбинация этих способов решения задачи позволяет получить наиболее достоверный результат. Анализ полученных результатов решения этой задачи позволяет перейти к решению новой задачи, связанной с разработкой мероприятий и средств повышения уровня электромагнитной совместимости сети и присоединенных к ней потребителей электрической энергии.

Регламентируемые ГОСТ 32144–2013 показатели качества электрической энергии можно классифицировать по двум группам: первая - отклонение частоты Δf и медленные изменения напряжения $\delta U_{(+)}$, $\delta U_{(-)}$, отличительной особенностью которой является поддержание показателей качества общесистемными средствами регулирования уровня частоты и напряжения; вторая - суммарный коэффициент гармонических составляющих K_U ,

коэффициент искажения n -ой гармонической составляющей $K_{U(n)}$, коэффициент обратной последовательности K_{2U} , коэффициент нулевой последовательности K_{0U} , размах колебания напряжения δU_t , доза фликера P_{St} . Источниками искажения являются потребители электрической энергии и для последующей их корректировки необходимо проведение технических мероприятия как на этапе проектирования системы электроснабжения горного предприятия, так и на этапе эксплуатации.

Показателями качества электрической энергии, относящимися к гармоническим составляющим напряжения являются: значение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (отношения среднеквадратического значения суммы всех гармонических составляющих до 40-го порядка к среднеквадратическому значению основной составляющей) K_U , % в точке передачи электрической энергии. В зарубежной литературе данный параметр обозначается как THD (Total harmonic distortion – суммарное гармоническое искажение); значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения до 40-го порядка $K_{U(n)}$ приводится в процентах напряжения от основной гармонической составляющей U_1 в точке передачи электрической энергии.

Применение тех или иных способов и специальных средств, повышающих показатели качества электрической энергии, возможно только при детальном анализе системы электроснабжения, схемы подключения, мощности и режимов работы потребителей электрической энергии, вида и уровня, создаваемых данным потребителем помех, а также технико-экономической эффективностью принимаемого решения [6, 12, 13, 14, 20, 28, 29, 32, 36, 37, 48, 58, 65, 66, 67, 86, 88, 90]. При наличии нескольких видов электромагнитных помех, вносимых потребителем, компенсация уровня одной из них влияет на уровень другой, как правило, негативно [32, 34, 36, 38, 40, 46, 48, 60, 71, 72].

Следует отметить, что все мероприятия по повышению качества электрической энергии в сетях можно классифицировать как:

- Организационно-проектные мероприятия, позволяющие повысить уровни качества электрической энергии на стадии утверждения проекта системы электроснабжения того или иного конкретного предприятия;

- Технические мероприятия, которые позволяют повысить уровень качества электрической энергии за счет специальных устройств, способных активно корректировать показатели качества при существующих схемах электроснабжения конкретного предприятия.

Для повышения уровня показателей качества электрической энергии применяют специальные устройства ФКУ (фильтр-компенсирующие устройства), СУ (симметрирующие устройства), а также разнообразные их комбинации [2, 3, 21, 24, 25, 27, 32, 33, 47, 49, 59, 75, 93, 99, 100, 103, 107, 114, 116, 122]. Следует отметить, что в специфических условиях подземных горных работ, в том числе и угольных шахт, опасных по внезапным выбросам газа и пыли, данные устройства не используются [62, 77, 78, 79, 82, 83, 87]. Специальные устройства, повышающие уровень показателей качества электрической энергии, не являются унифицированными и при их выборе необходимо руководствоваться следующими факторами:

- представлением о причинах возникновения электромагнитных помех (высших гармоник напряжения и тока), а также спектральным анализом этих помех;

- местоположением источников электромагнитных помех в схеме электроснабжения, а также мощностью системы в точках подключения источников электромагнитных помех;

- наличием в системе электроснабжения других, ранее установленных, специализированных средств повышения качества электрической энергии;

- влиянием источников электромагнитных помех на ряд других потребителей электрической энергии, расположенных в непосредственной близости от источника и питающегося от одного фидера;

- частотными характеристиками системы электроснабжения с целью недопущения появления резонансных явления на частотах, генерируемыми источниками электромагнитных помех.

Фильтр-компенсирующие устройства можно классифицировать:

- по виду используемых элементов: пассивные фильтры, активные фильтры, комбинированные фильтры;
- по количеству фаз: однофазные, трехфазные (трехпроводные), трехфазные (четырёхпроводные);
- по схеме присоединения: последовательные фильтры, параллельные фильтры, комбинированные фильтры (включающие в себя как параллельное соединение элементов, так и последовательное).

Оценку качества электрической энергии следует производить определяя степень соответствия параметров электрической энергии (напряжение, частоту, форму кривой электрического тока и т.д.) установленным значениям [34, 35, 37, 38, 40, 42, 45, 46, 48, 54, 58, 60, 61, 68, 69, 78, 79, 94, 95, 100]. Качество электрической энергии является составляющей электромагнитной совместимости, характеризующей электромагнитную среду [15, 16, 22, 39, 54, 70, 97]. Параметры качества электрической энергии являются динамичными величинами и зависят от многих внешних факторов, таких как изменение нагрузки энергосистемы, возникновение аварийных режимов в сети, изменение горно-геологических условий месторождения и т.д.

Следует отметить, что уровень интергармонических составляющих напряжения электропитания увеличивается в связи с применением в электроустановках частотных преобразователей и другого управляющего оборудования. Допустимые уровни интергармонических составляющих напряжения электропитания, в настоящее время ГОСТ 32144–2013 не регламентирует.

Снижение качества электрической энергии может привести к изменениям режимов работы электроприёмников, следовательно, к снижению производительности рабочих машин, что серьезным образом скажется на

уровне добычи шахт особенно высокопроизводительных, так как их очистные комплексы оборудованы преобразовательными устройствами, создающие негативные помехи в подземных электрических сетях [12, 34, 35, 38, 40, 45, 52, 58, 60, 61, 68, 94, 95, 102].

Диаграмма повышения эффективности системы электроснабжения угольных шахт представлена на рис. 1.1. Согласно проведенным исследованиям, все мероприятия по повышению эффективности систем электроснабжения угольных шахт можно разделить на:

- технические мероприятия;
- организационные мероприятия;
- методические мероприятия.

Анализ технических мероприятий показал, что из пяти, наиболее перспективных научных задач по повышению эффективности систем электроснабжения угольных шахт, как минимум две имеют непосредственное отношения к задачам повышения качества электрической энергии в подземных электрических сетях, а именно: разработка современных систем компенсации реактивной мощности и контроля качества электрической энергии; расширение режимов работы горных машин и механизмов за счет применения современных систем управления электроприводами. Как было выявлено ранее, увеличение числа преобразовательных устройств значительно ухудшает гармонический состав в подземных электрических сетях.

Анализ мероприятий по повышению качества электрической энергии, в подземных электрических сетях угольных шахт, позволил выявить три вида мероприятий (рис. 1.2). Технические мероприятия включают в себя: разработку и применение специализированных устройств по обеспечению качества электрической

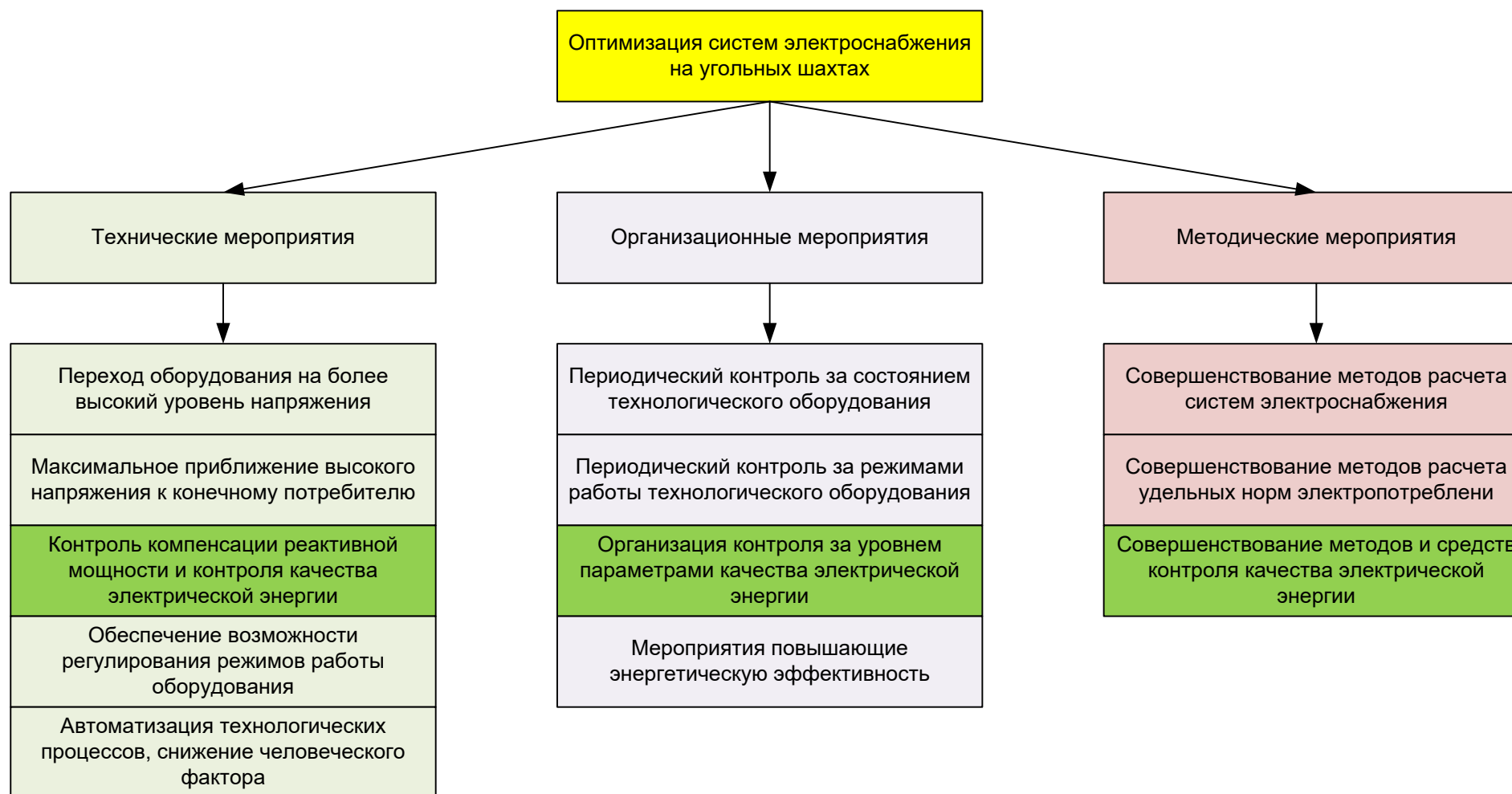


Рисунок 1.1 - Диаграмма мероприятий по повышению эффективности системы электроснабжения угольных шахт



Рисунок 1.2 - Диаграмма повышения качества электрической энергии угольных шахт

энергии; систематизированный мониторинг качества электрической энергии в подземных электрических сетях угольных шахт. Организационные мероприятия предусматривают периодический контроль над уровнем помех вносимых преобразовательной техникой в систему электроснабжения, а также разработку и внедрение нормативно-правовых документов по контролю над качеством электрической энергии в условиях угольных шахт.

Методические мероприятия включают разработку методик по ограничению помех, вносимых преобразовательной техникой в систему электроснабжения угольных шахт, а также совершенствование методов и средств контроля качества электрической энергии.

Все вышеперечисленные мероприятия позволят значительно повысить качество электрической энергии в подземных электрических сетях угольных шахт, тем самым повысить их надежность и снизить потери электрической энергии.

1.3 Постановка задач исследования

Применение частотно-регулируемого электропривода и электродвигателей постоянного тока требует использование преобразовательных и выпрямительных устройств, обеспечивающих нормальную работу такого типа приводов, которые, являясь нелинейной нагрузкой, требуют повышенного потребления реактивной энергии.

Частотные преобразователи применяются для 2/4 квадратного преобразования скорости вращения асинхронных электродвигателей в широком диапазоне благодаря изменению частоты питающего напряжения. Помимо этого, они обеспечивают защиту электродвигателя от перегрузок, частотное управление позволяет экономично осуществлять плавное регулирование частоты вращения, поскольку двигатель работает с малым скольжением ротора во всем диапазоне регулирования, сохраняя высокий КПД и хорошую жесткость механической характеристики. Генерируя высшие гармоники, подобная нелинейная нагрузка вызывает нелинейные искажения кривой напряжения сети, т.е. несинусоидальные режимы, которые неблагоприятно сказываются на работе силового электрооборудования, защите электроустановок, автоматике и связи, снижении уровня электробезопасности и энергоэффективности.

Поэтому целью работы является повышение показателей качества электрической энергии в подземных сетях до нормативных значений путем ограничения влияния высших гармоник.

Выполненный обзор научных публикаций в соответствии с поставленной в работе целью позволил сформулировать следующие основные задачи исследования:

1. Структурный анализ электрооборудования и электрических сетей высокопроизводительных угольных шахт с целью выявления источников высших гармоник, оказывающих негативное влияние на их работу;

2. Экспериментальное исследование и анализ гармонического состава электроэнергии в электрических сетях высокопроизводительных угольных шахт для обоснования повышения показателей качества электроэнергии;
3. Анализ схемных решений активных фильтров высших гармоник для синтеза устройства мониторинга и ограничения влияния высших гармоник в подземных электрических сетях угольных шахт высокой производительности;
4. Моделирование гармонического состава показателей качества электрической энергии в системе электроснабжения выемочного участка высокопроизводительной угольной шахты;
5. Обоснование структурной схемы устройства автоматизированного мониторинга гармонического состава подземных электрических сетей высокопроизводительных угольных шахт.

Глава 2. Экспериментальные исследования и анализ качества электроэнергии в электрических сетях высокопроизводительных угольных шахт

2.1 Общая характеристика шахтных электрических сетей

Структура и основные характеристики схемы электроснабжения высокопроизводительных угольных шахт обусловлены рядом горно-геологических и технологических факторов [50, 51, 89], основными из которых являются:

- мощность и глубина залегания пластов;
- метанообильность;
- гидрогеология и водоприток;
- схема вскрытия шахтного поля;
- способ подготовки шахтного поля;
- система разработки угольного пласта.

Кроме этого, необходимо учитывать требования обеспечения максимальной безопасности при применении электрической энергии в специфических условиях горных выработок угольных шахт, в том числе шахт, опасных по внезапным выбросам газа и пыли. Все представленные факторы, а также требования обеспечения бесперебойности и надежности схем электроснабжения, обоснованные расчеты потерь электрической энергии при ее транспортировке до конечных потребителей определяют экономические показатели конкретной схемы электроснабжения [85, 104, 105].

Анализ ряда схем электроснабжения высокопроизводительных угольных шахт позволил определить наиболее характерные из них [85, 104, 105]. В частности, на угольных шахтах Кузбасса достаточно широкое распространение получили совмещенные схемы электроснабжения. В этом случае с общих шин ГПП (главная понизительная подстанция) вторичное напряжение 6/10 кВ поступает к потребителям поверхности по воздушным или кабельным линиям, на шины ЦПП (центральная подземная подстанция) по кабельным линиям, проложенным в стволах, а также по кабельным линиям

на РПП (распределительный подземный пункт), сооруженным под скважиной. Пример схемы электроснабжения угольной шахты, поостренной по совмещенной системе, представлен на рис. 2.1. Согласно представленной схеме на ГПП шахты поступает напряжение от двух независимых источников напряжением 110/35 кВ, которое понижается до уровня 10/6 кВ и подается на шины ГПП. От шин ГПП электроэнергия распределяется к потребителям поверхности по воздушным или кабельным линиям, а также кабельными линиями по стволу шахты до ЦПП и далее кабельными линиями до конечных потребителей. Кроме того, на флангах шахтного поля имеется ряд скважин, через которые осуществляется питание по кабельным линиям ряда подземных потребителей [57]. Следует отметить, что транспортировка электроэнергии до фланговых скважин осуществляется, как правило, воздушными линиями.

На рис. 2.2 представлена обособленная схема электроснабжения угольной шахты. Применение данного вида схемы электроснабжения обусловлены действующими Правилами безопасности при питании подземных потребителей угольных шахт, разрабатывающих пласты, опасные по внезапным выбросам газа и пыли. При такой схеме электроснабжения используются модифицированные трехобмоточные трансформаторы, питающие от отдельных вторичных обмоток потребители поверхности и подземные потребители угольной шахты. Следует отметить, что такое разделение схемы электроснабжения шахты позволяет избежать возможные перенапряжения в подземных сетях, ослабить влияние на подземную электрическую сеть высших гармоник тока и напряжения, а также снизить колебание напряжения при включении на поверхности достаточно мощных потребителей электроэнергии [44].

Специфика работы угольных шахт обусловлена непрерывным перемещением забоев выемочных и проходческих участков, наличием опасных компонентов в рудничной атмосфере, которая требует значительной

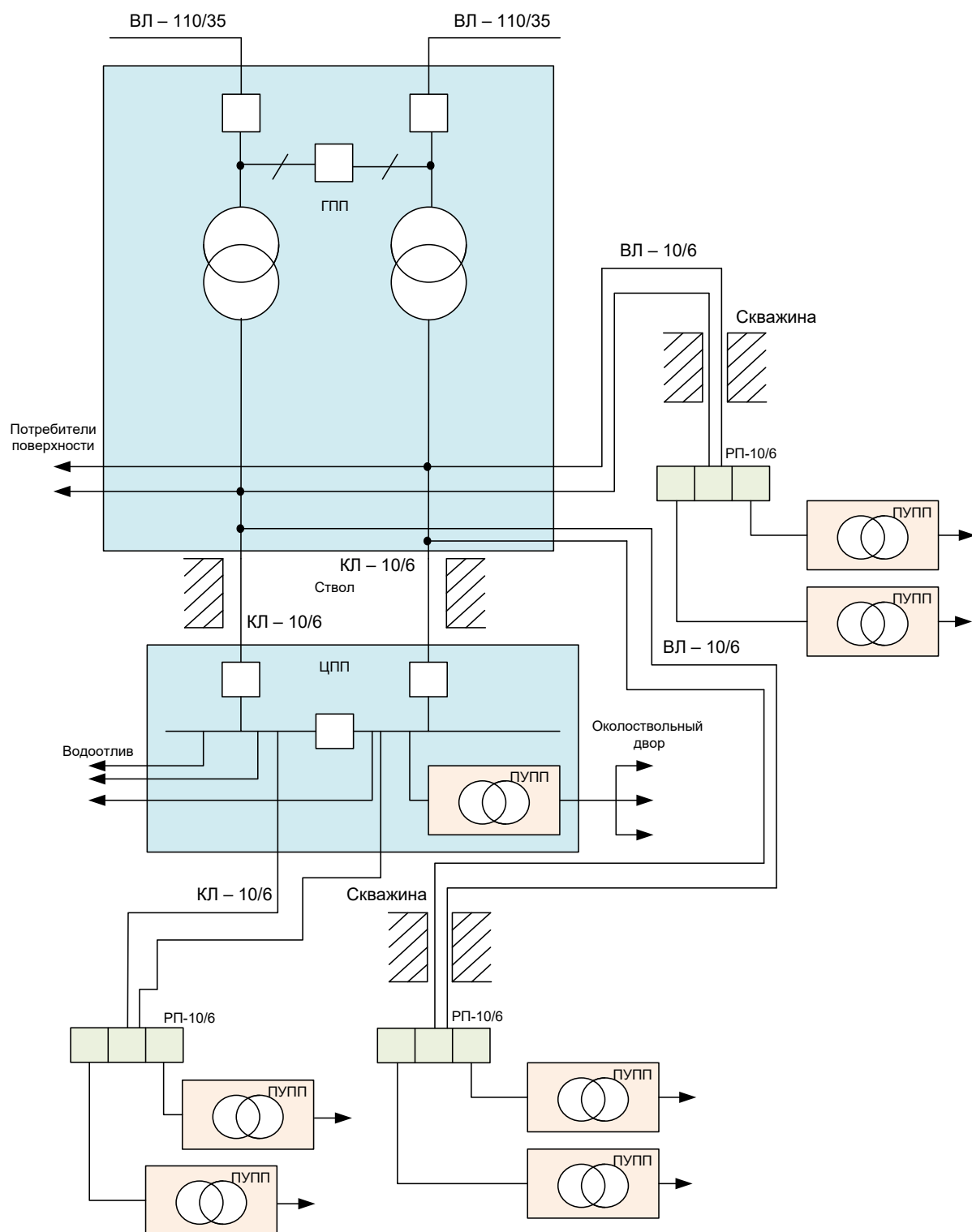


Рисунок 2.1 – Совмещенная схема электроснабжения угольной шахты

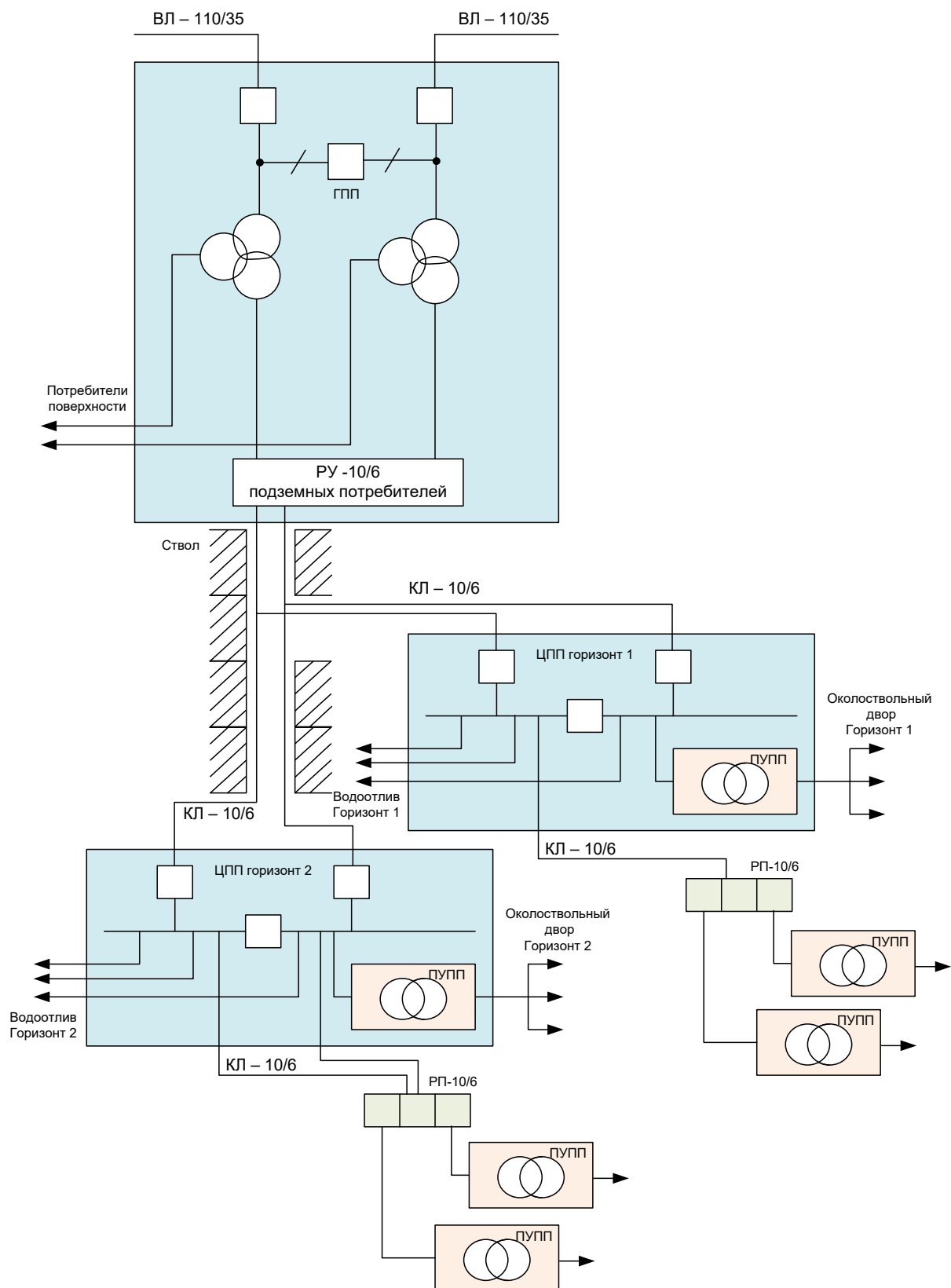


Рисунок 2.2 – Обособленная схема электроснабжения угольной шахты

корректировке реальных схем электроснабжения угольных шахт от проектных решений на момент эксплуатации [7 – 11, 57].

Ввиду этого схемы электроснабжения угольных шахт следует считать - развивающимися системами, находящимися под стохастическим воздействием. Под этим воздействием следует понимать процесс, поведение которого не является детерминированным и последующие состояния такой системы описываются как величинами, которые могут быть предсказуемы, так и случайными. Именно это явление определяет различие в схемных решениях для похожих горно-геологических условий и одинаковой системе разработки угольных пластов. Условия эксплуатации и воздействие различных факторов, в том числе субъективных, приводят к разнообразию схемных решений систем электроснабжения угольных шахт, которые не могут быть охарактеризованы общими показателями [44].

В качестве примера на рис. 2.3 представлена схема электроснабжения шахты «Полысаевская» АО «СУЭК-Кузбасс». Транспортировка электрической энергии к высокопроизводительному выемочному участку осуществляется по высоковольтным ствольным кабельным линиям к ЦПП (центральной понизительной подстанции) горизонта, далее по высоковольтным кабельным линиям на распределительный пункт и далее к энергопоезду выемочного участка. В его состав входят три понизительные подстанции ТЕК 1324 ($S=1250$ кВА), ТЕК 1534 ($S=2500$ кВА), ТЕК 1324 ($S=1500$ кВА), служащие для преобразования первичного напряжения 6 кВ во вторичное напряжение 3,3 кВ и 1,14 кВ, необходимого для питания соответствующих потребителей электрической энергии, в частности - комбайна Eickhoff SL-300, забойного конвейера FFC-9 Glinik, дробильного комплекса FLB-10G Glinik, перегружателя FSL-9 Glinik. А также ряд коммутационных и защитных аппаратов. Следует отметить, что все оборудование выемочного участка выполнено во взрывозащищенном исполнении.

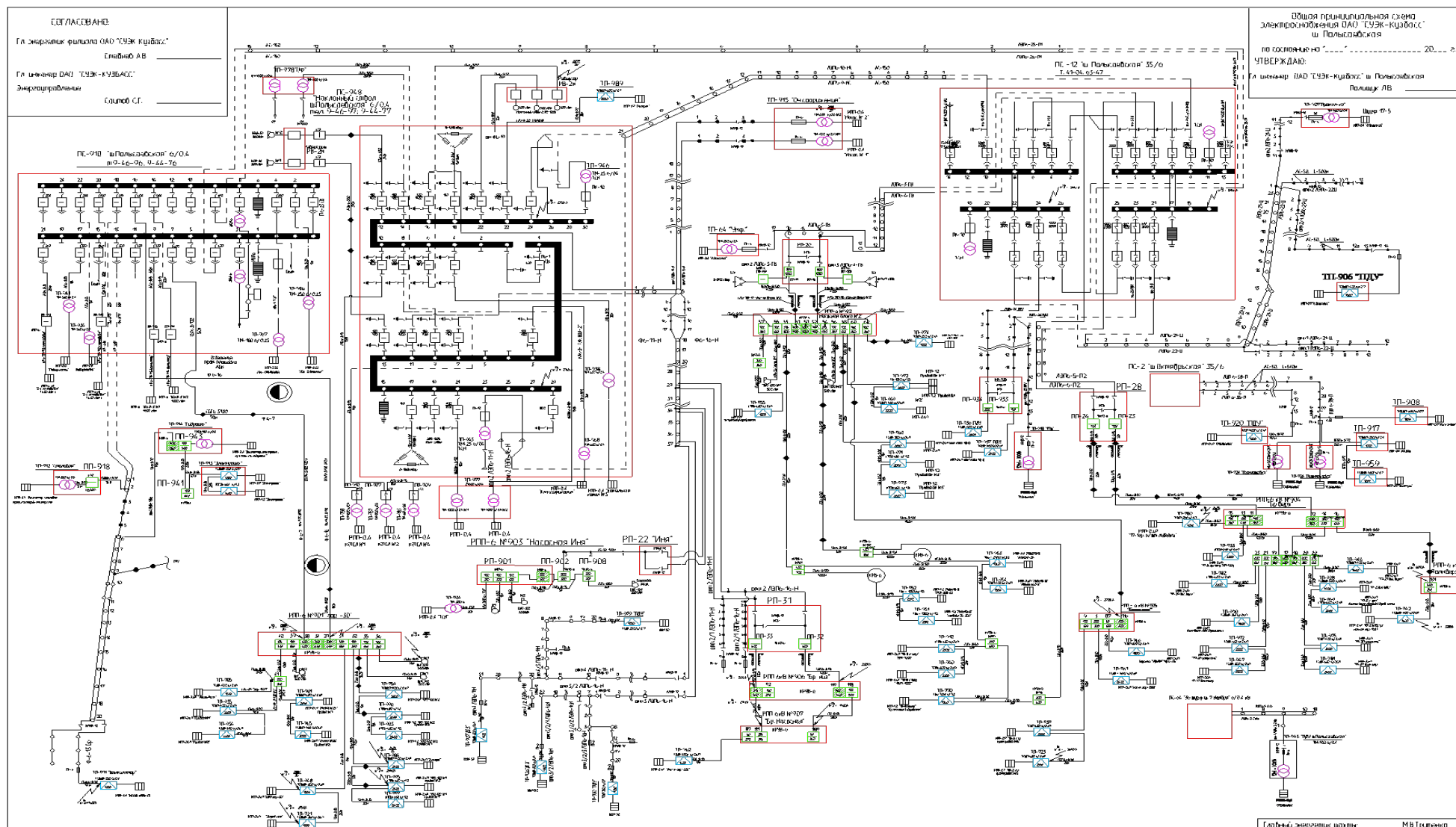


Рисунок 2.3 - Схема электроснабжения шахты «Полысаевская» АО «СУЭК-Кузбасс»

2.2 Методика экспериментальных исследований показателей качества электрической энергии

На рис. 2.4 представлена однолинейная упрощенная схема электроснабжения шахты «Полысаевская» АО «СУЭК-Кузбасс», на которой представлены точки установки анализаторов качества электрической энергии с целью измерения уровня гармонического состава как на понизительных подстанциях поверхности, так и в подземных сетях, питающих высокопроизводительные выемочные участки.

Исследования показателей качества электрической энергии на соответствие требованиям ГОСТ 32144 – 2013 были проведены на понизительных подстанциях, питающих как подземные потребители электрической энергии, так и потребители поверхностного комплекса угольной шахты «Полысаевская» АО «СУЭК-Кузбасс». Исследования на понизительных подстанциях были проведены в соответствии с РД 153-34.0-15.501-00 «Методические указания по контролю и анализу качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Часть 1. Контроль качества электрической энергии», с использованием анализатора ПКЭ «Ресурс UF2MB-3П15-5», а исследования в подземных условиях проводились с использованием анализатора «UPM 3080».

Исследования на ПС №12 «Полысаевская» 35/6 кВ, ПС-910 и ПС-948 проводились путем подключения измерительных цепей анализаторов к шинным измерительным трансформаторам, от которых поступает питание потребителям. Время установки анализатора, в соответствии с РД 153-34.0-15.501-00, составляет 1 сутки (24 часа) по каждой точке замера. Данного объема достаточно для проведения исследования.

Допустимые значения коэффициента n -ой гармонической составляющей напряжения (в процентах) представлены в табл. 2.1.

Методика экспериментальных исследований качества электрической энергии представлен в виде алгоритма на рис. 2.5.

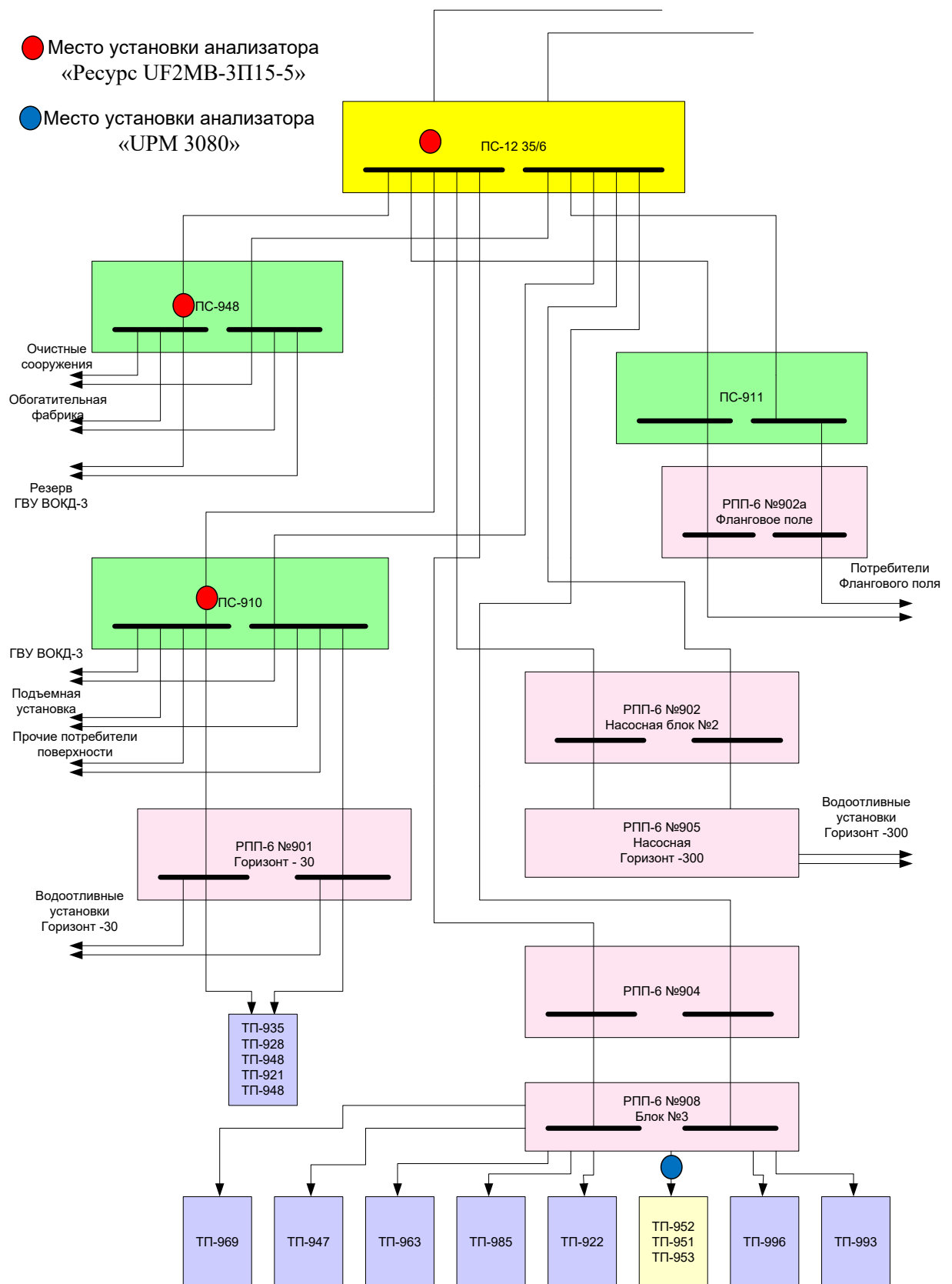


Рисунок 2.4 - Однолинейная упрощенная схема электроснабжения шахты
«Полысаевская» АО «СУЭК-Кузбасс»

Таблица 2.1 – Допустимые значения коэффициента n -ой гармонической составляющей напряжения (в процентах)

Нечетные гармоники, не кратные 3, при $U_{\text{ном}}$, кВ					Нечетные гармоники, кратные 3, при $U_{\text{ном}}$, кВ					Четные гармоники при $U_{\text{ном}}$, кВ				
n	0,38	6-20	35	110-330	n^*	0,38	6-20	35	110-330	n^*	0,38	6-20	35	110-330
5	6,0	4,0	3,0	1,5	3	5,0	3,0	3,0	1,5	2	2,0	1,5	1,0	0,5
7	5,0	3,0	2,5	1,0	9	1,5	1,0	1,0	0,4	4	1,0	0,7	0,5	0,3
11	3,5	2,0	2,0	1,0	15	0,3	0,3	0,3	0,2	6	0,5	0,3	0,3	0,2
13	3,0	2,0	1,5	0,7	21	0,2	0,2	0,2	0,2	8	0,5	0,3	0,3	0,2
17	2,0	1,5	1,0	0,5	>21	0,2	0,2	0,2	0,2	10	0,5	0,3	0,3	0,2
19	1,5	1,0	1,0	0,4						12	0,2	0,2	0,2	0,2
23	1,5	1,0	1,0	0,4						>12	0,2	0,2	0,2	0,2
25	1,5	1,0	1,0	0,4										
>25	0,2+	0,2+	0,2+	0,2+										
	+1,3	+0,8	+0,6	+0,2x										
	x	x	x	x25/n										
	x25/n	x25/n	x25/n											
	n	n	n											

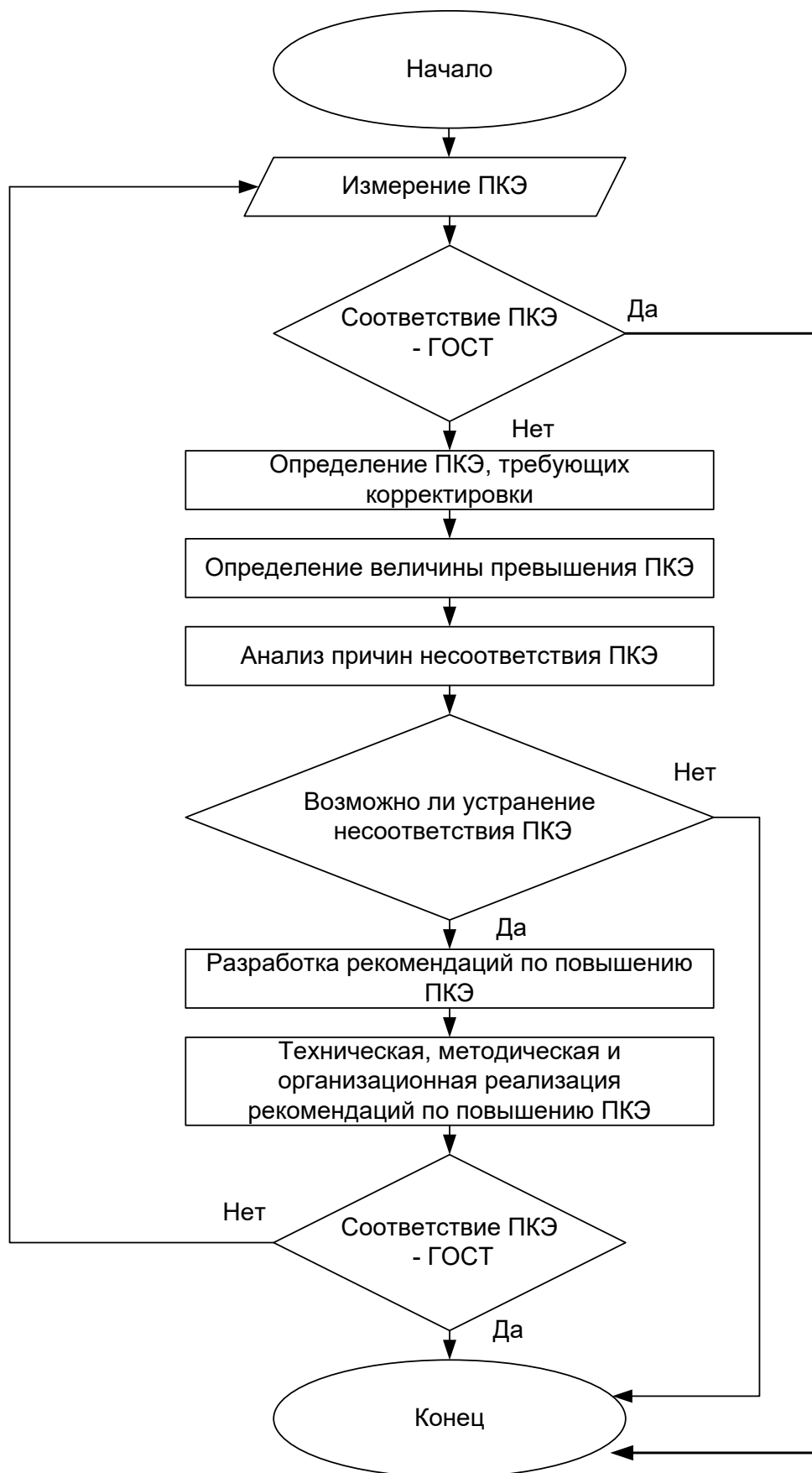


Рисунок 2.5 – Алгоритм экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования показателей качества электрической энергии в подземных электрических сетях угольной шахты были проведены в условиях высокопроизводительных выемочных участков угольных шахт «Полысаевская» и «С.М. Кирова» АО «СУЭК-Кузбасс».

В качестве объекта исследования параметров качества электрической энергии в подземных электрических сетях выбраны сети высокопроизводительных выемочных участков угольной шахты. Выбор обусловлен тем, что это начало ответственного общешахтного технологического процесса, от эффективной работы которого зависит работа и производительность предприятия в целом [55, 57, 80, 81, 106, 113, 119].

В качестве анализатора гармонического состава для подземных электрических сетей угольных шахт использовался регистратор параметров электрической энергии производства Algodue Elettronica UPM 3080 (Италия). Данный регистратор, помимо измерения основных параметров электрической энергии, позволяет провести измерения отдельного и полного коэффициента гармонических искажений (THD) по напряжению и току до 40 гармоники. Следует отметить, что регистратор имеет встроенную память, накапливающая полученную информацию для дальнейшего исследования параметров электрической энергии [57].

Установка данного регистратора параметров электрической энергии в специфических условиях горных выработок угольных шахт, в том числе опасных по внезапным выбросам газа и пыли, непосредственно на выемочном участке не представляется возможным.

Это обусловлено наличием у данного регистратора не искробезопасных контактов, подключение которых может вызвать воспламенение метана, являющийся побочным продуктом при добыче угля подземным способом. Поэтому все оборудование в условиях угольных шахт, в том числе опасных по внезапным выбросам газа и пыли, должны иметь специальные искробезопасные цепи и взрывозащищенное исполнение.

Порядок проведения экспериментальных исследований гармонического состава в подземных электрических сетях угольных шахт в том числе опасных по внезапным выбросам газа и пыли следующая:

1. Регистратор параметров электрической энергии производства Algodue Elettronica UPM 3080 на поверхности шахты устанавливается в высоковольтное комплектное распределительное устройство КРУВ-6 и жестко фиксируется [63];
2. Измерительные цепи регистратора по току и напряжению подключаются к вторичным цепям системы релейной автоматики и защиты КРУВ-6 [63];
3. Напряжение питания регистратора подключается к вторичным цепям системы релейной автоматики (Регистратор питается однофазным напряжением в диапазоне от 100 до 220 В) [63].
4. Оборудованное регистратором комплектное распределительное устройство КРУВ-6 спускается на выемочный участок угольной шахты и подключается в качестве вводного высоковольтного устройства высокопроизводительного выемочного участка.
5. При различных режимах работы основного технологического оборудования выемочного участка автоматически фиксируются показатели качества электрической энергии [63].
6. Оборудованное регистратором комплектное распределительное устройство КРУВ-6 отключается от питающей линии и поднимается на поверхность угольной шахты.
7. На поверхности шахты происходит демонтаж регистратора из комплектного распределительного устройства КРУВ-6 и происходит передача данных из регистратора параметров качества электрической энергии на устройства хранения данных.
8. В условиях испытательной лаборатории анализируются полученные данные и подготавливается заключение о проведенных исследованиях [63].

Согласно порядку проведения экспериментальных исследований гармонического состава в подземных электрических сетях угольных шахт регистратор параметров электрической энергии был установлен на вводной ячейке выемочного участка шахты «Полысаевская» АО «СУЭК – Кузбасс» (рис. 2.6, рис.2.7) [63]. Данная шахта производит отработку угольного пласта «Бреевский» и имеет один выемочный участок.

Помимо шахты «Полысаевская» аналогичное исследование проводилось на угольной шахте «С.М. Кирова». Данная шахта производит отработку угольных пластов «Болдыревский» и «Поленовский» и имеет два выемочных участка. Однако проведение экспериментальных исследований было возможно только на одном из них, а именно на выемочном участке, который производит отработку угольного пласта «Болдыревский», так как на выемочном участке пласта «Поленовский» происходил ремонт лавы и выемка угля не производилась.



Рисунок 2.6 - Общий вид регистратора параметров электрической энергии производства Algodue Elettronica UPM 3080 (Италия)

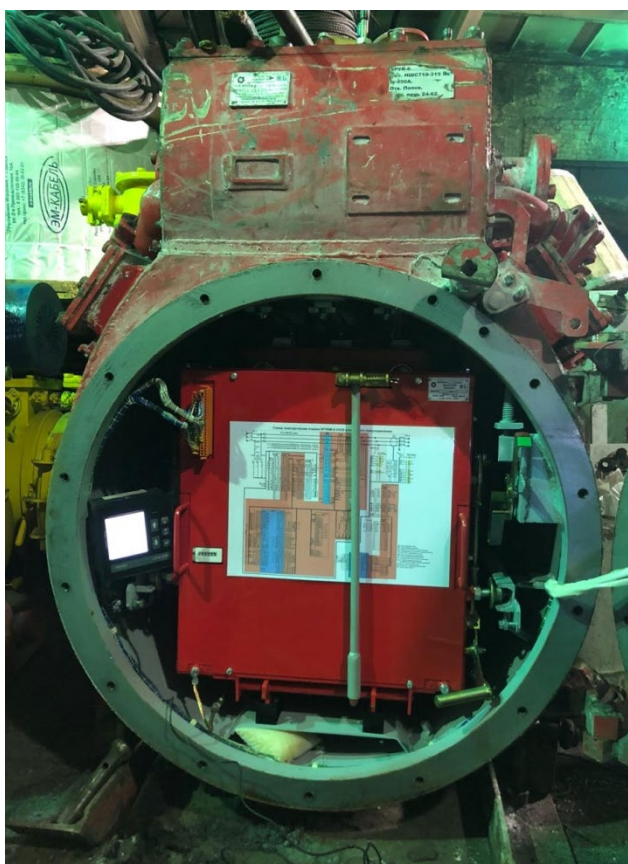


Рисунок 2.7– Общий вид КРУВ-6 со встроенным анализатором

2.3 Экспериментальные исследования и анализ качества электроэнергии в электрических сетях на поверхности шахт

Исследования качества электроэнергии в электрических сетях на поверхности шахт проводились на ПС-12 «Полысаевская» 35/6 кВ, ПС-910 и ПС-948, результатом которых явился ряд параметров оценки качества, представленных в графическом виде.

По подстанции ПС-12 «Полысаевская» получены: график отклонений междуфазных напряжений (рис. 2.8); график отклонений частоты (рис. 2.9); графики коэффициентов несимметрии по нулевой и обратной последовательности (рис. 2.10); графики коэффициентов искажения синусоидальности междуфазных напряжений (рис. 2.11); коэффициенты n -ых гармонических составляющих напряжения $U_{ав}$ (рис. 2.12).

По подстанции ПС-910 получены: график отклонений междуфазных напряжений (рис. 2.13); график отклонений частоты (рис. 2.14); графики коэффициентов несимметрии по нулевой и обратной последовательности (рис. 2.15); графики коэффициентов искажения синусоидальности междуфазных напряжений (рис. 2.16); Коэффициенты n -ых гармонических составляющих напряжения $U_{ав}$ (рис. 2.17).

На рис. 2.18 – 2.22 представлены графики по подстанции ПС-948: график отклонений междуфазных напряжений; график отклонений частоты; графики коэффициентов несимметрии по нулевой и обратной последовательности; графики коэффициентов искажения синусоидальности междуфазных напряжений; коэффициенты n -ых гармонических составляющих напряжения $U_{ав}$.

Анализ результатов исследования показателей качества электроэнергии на понизительных подстанциях ПС-12, ПС-910 и ПС-948 шахты «Полысаевская» позволяет сделать вывод [86], что приведённые показатели качества электрической энергии соответствуют предъявляемым требованиям по всем точкам измерения, а именно:

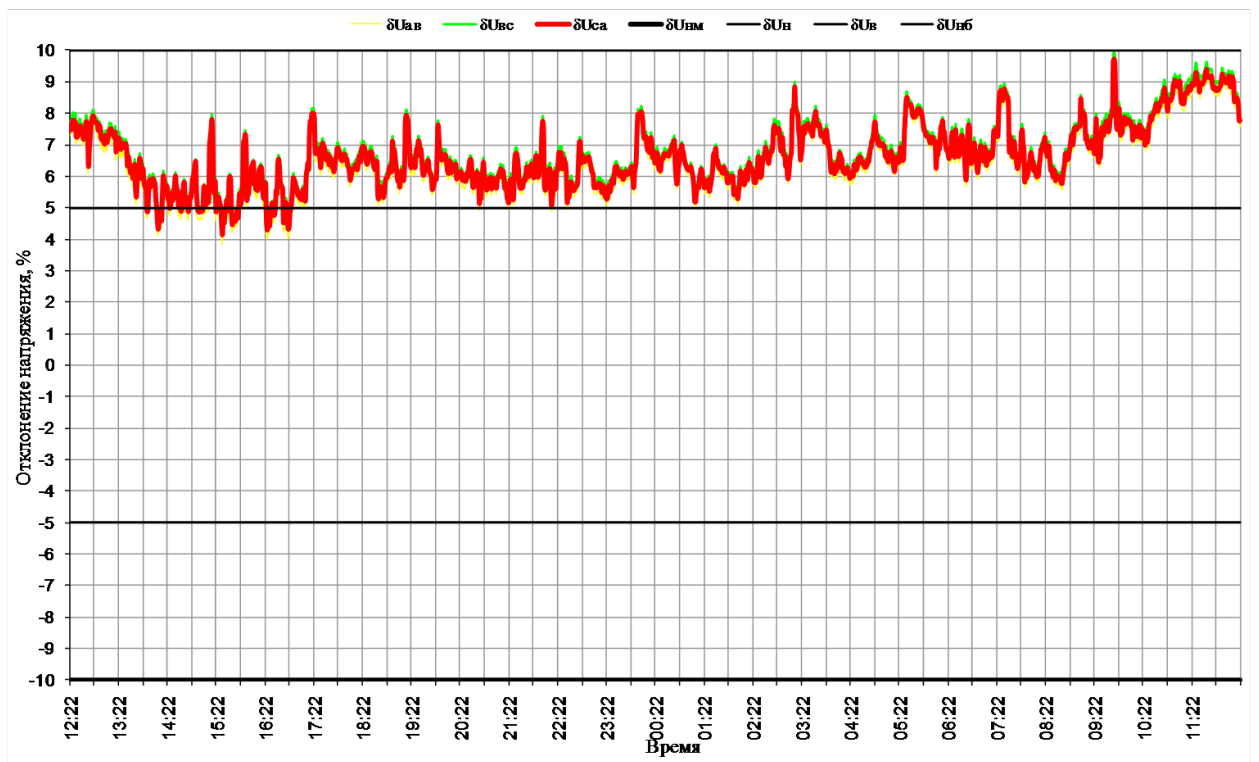


Рисунок 2.8 - График отклонений междупазных напряжений ПС-12

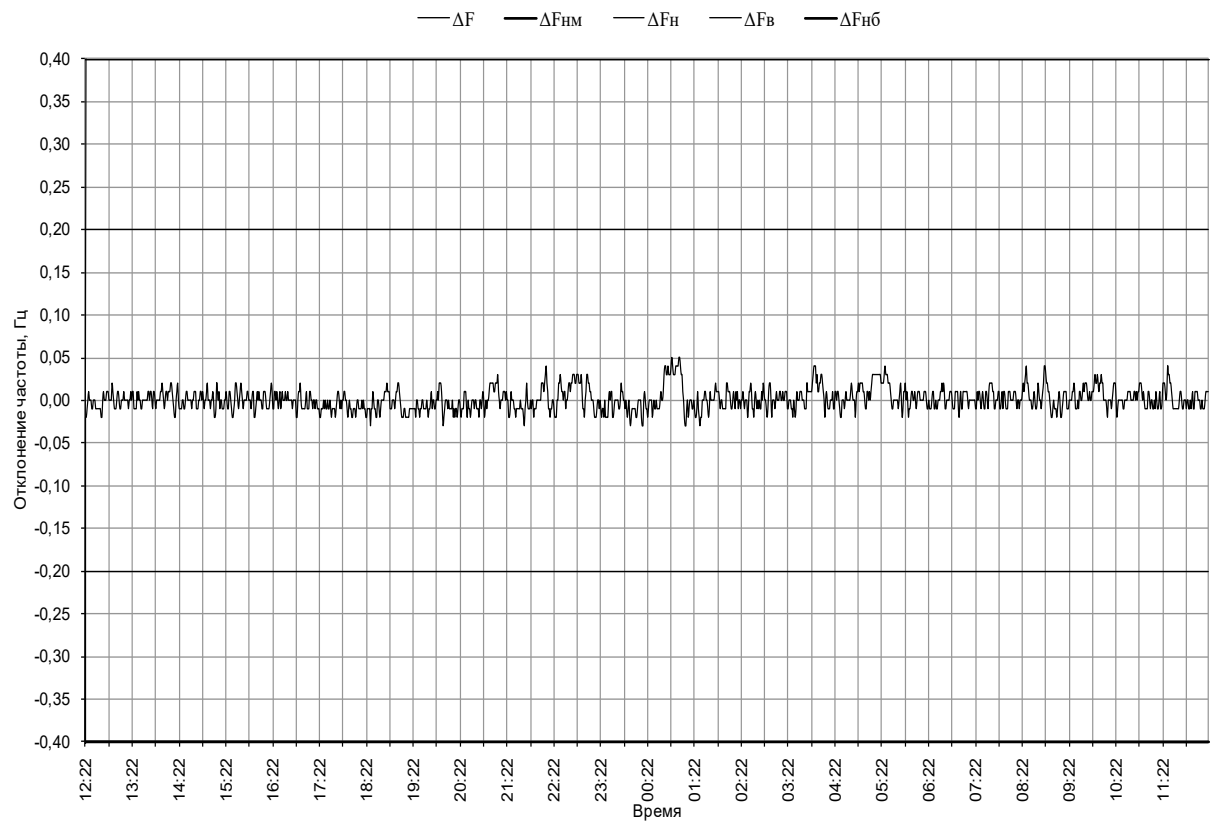


Рисунок 2.9 - График отклонений частоты ПС-12

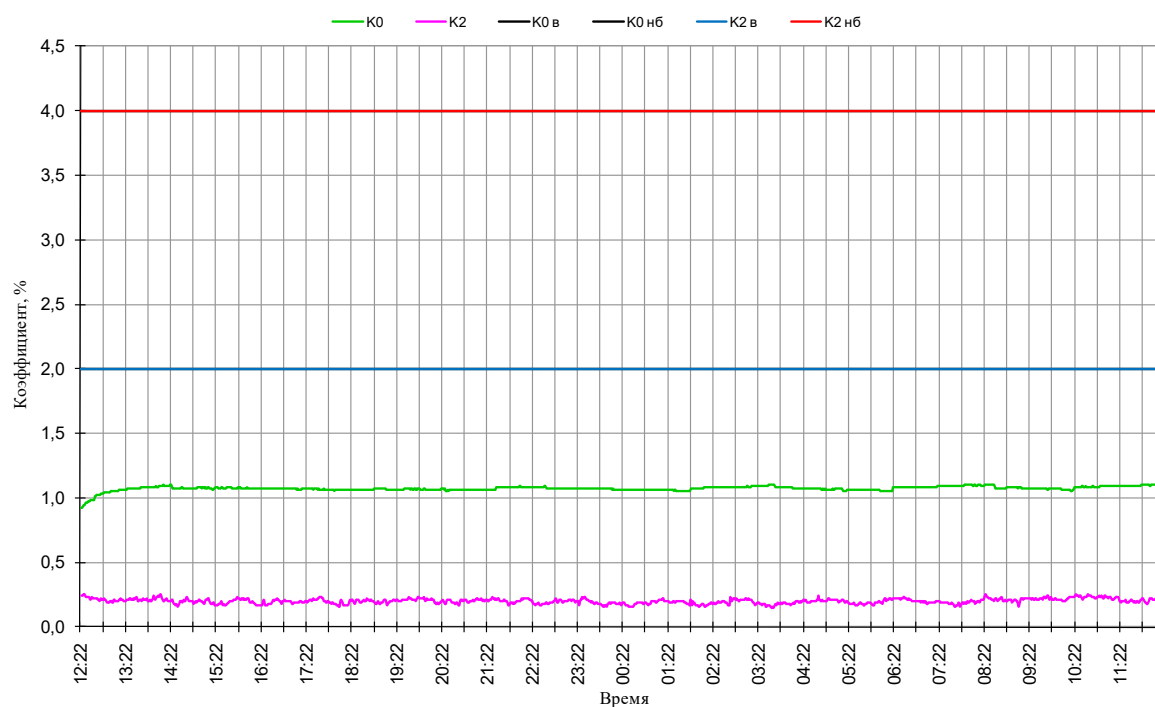


Рисунок 2.10 - Графики коэффициентов несимметрии по нулевой и обратной последовательности ПС-12

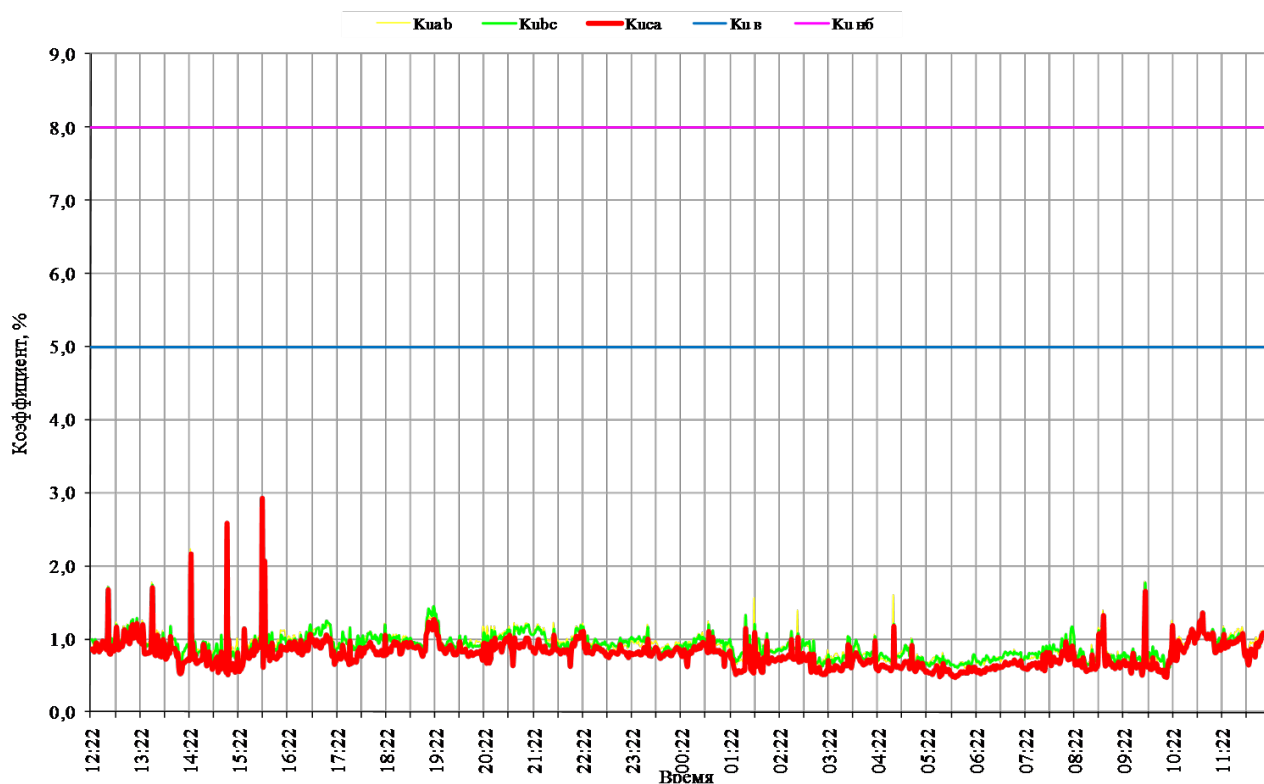


Рисунок 2.11 - Графики коэффициентов искажения синусоидальности междуфазных напряжений ПС-12

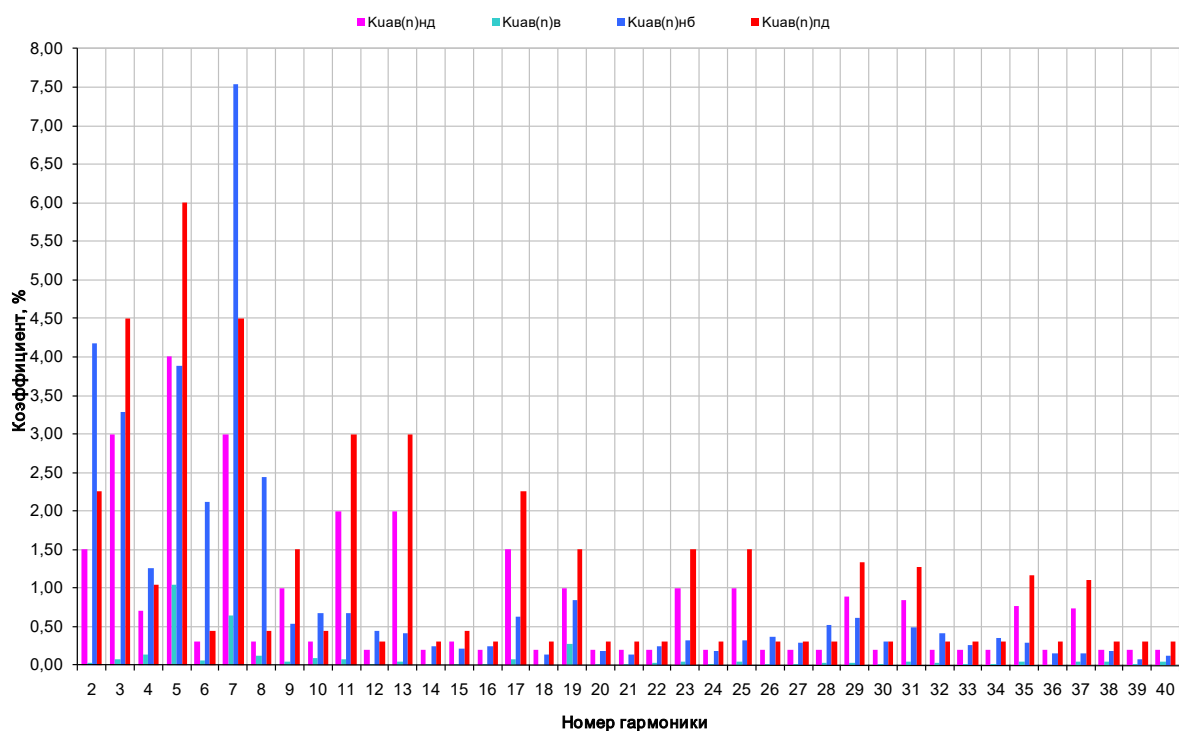


Рисунок 2.12 - Коэффициенты n-ых гармонических составляющих
напряжения $U_{ав}$ по ПС-12

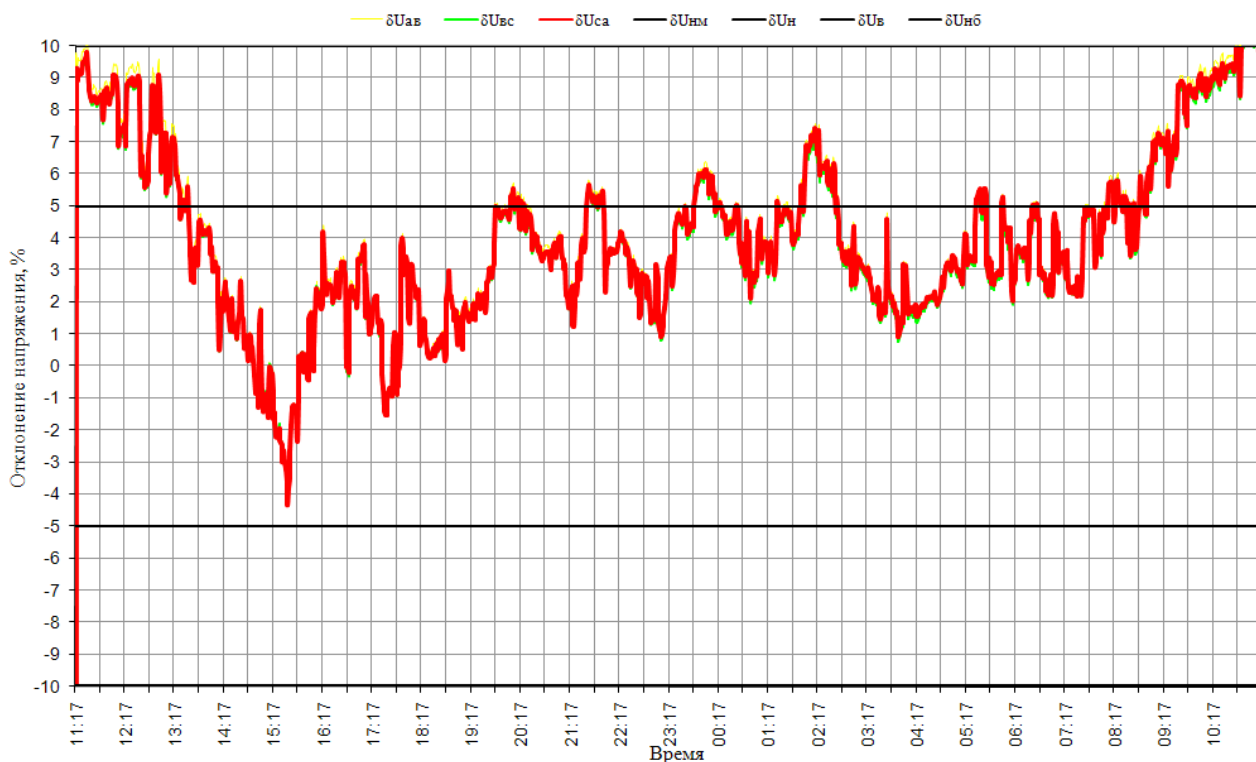


Рисунок 2.13 - Графики отклонений междуфазных напряжений по ПС-910

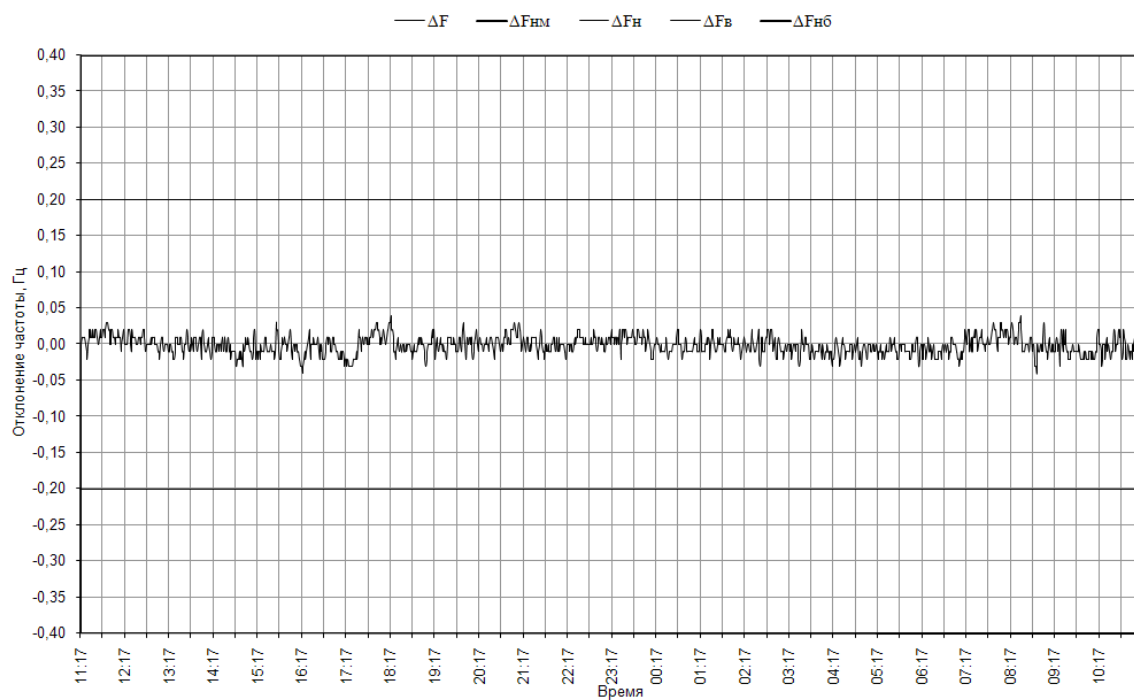


Рисунок 2.14 - График отклонения частоты по ПС-910

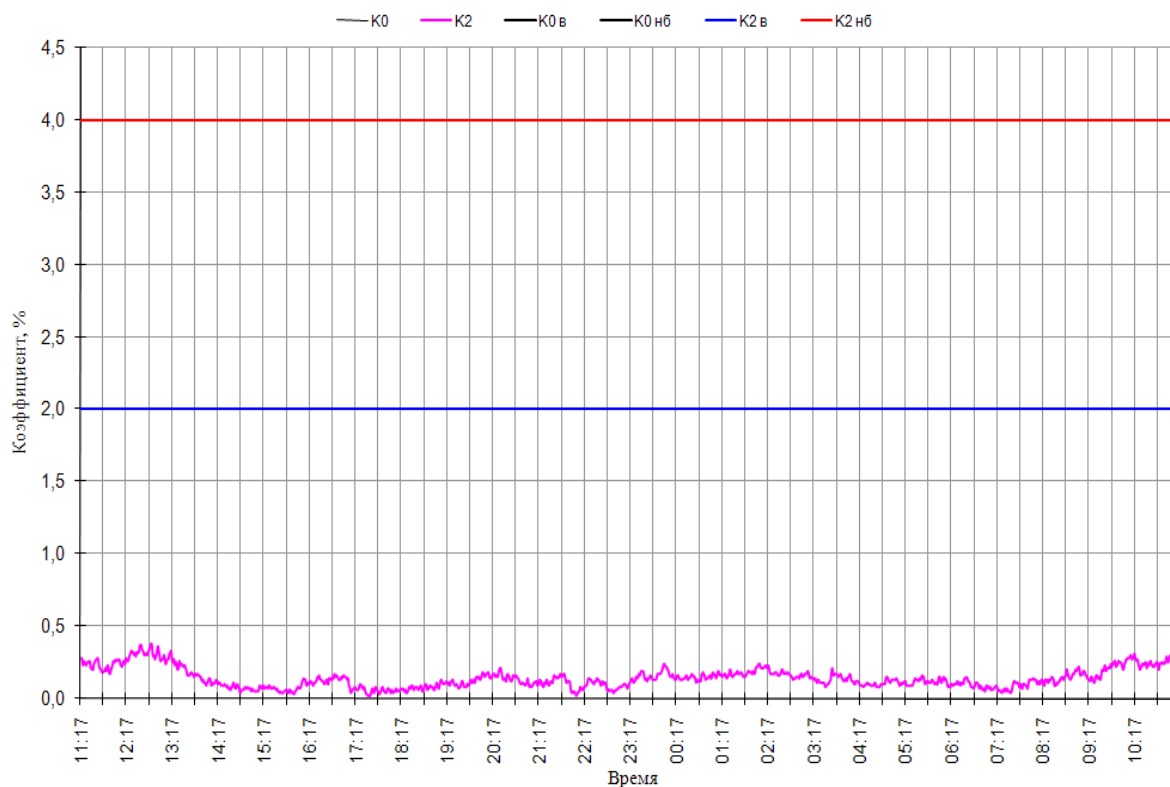


Рисунок 2.15 - Графики коэффициентов несимметрии по обратной последовательности по ПС-910

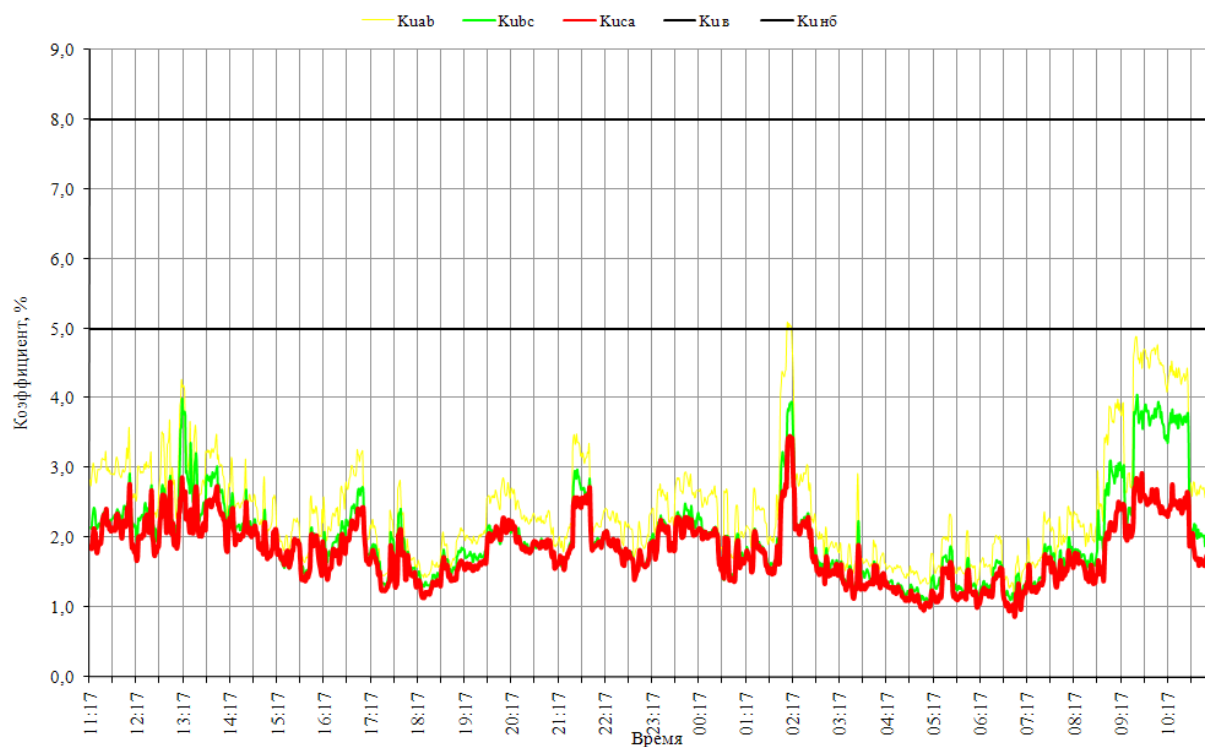


Рисунок 2.16 - Графики коэффициентов искажения синусоидальности междупазных напряжений по ПС-910

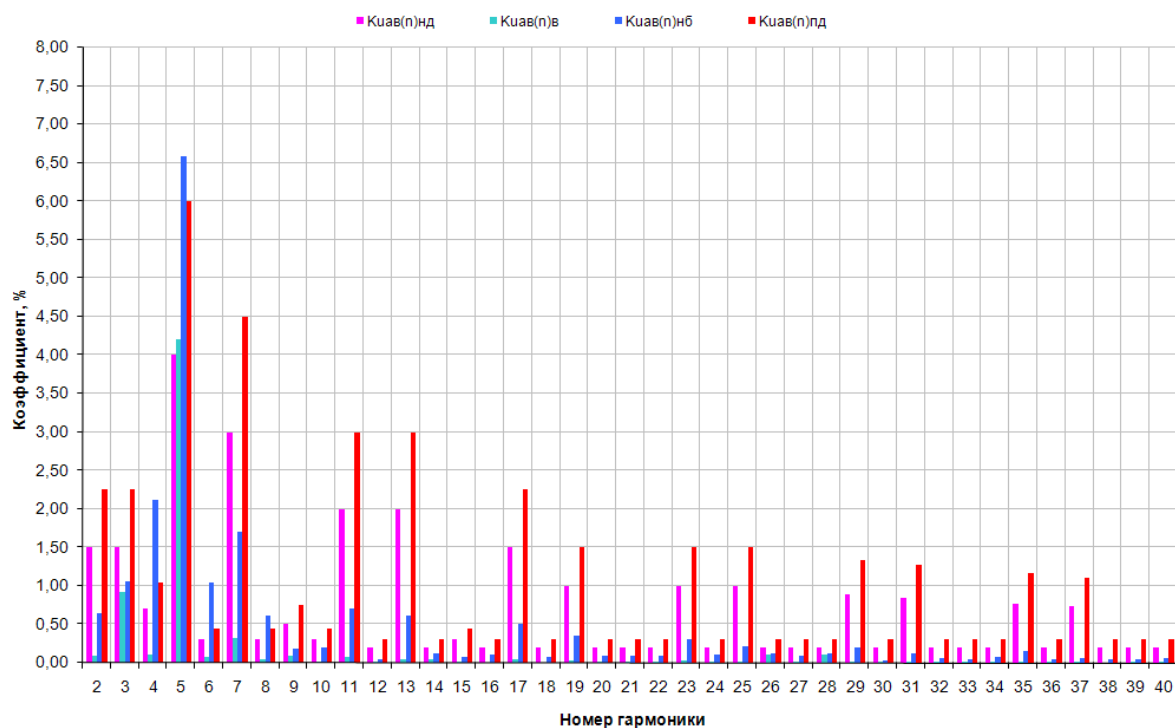


Рисунок 2.17 - Коэффициенты n-ых гармонических составляющих напряжения $U_{ав}$ по ПС-910

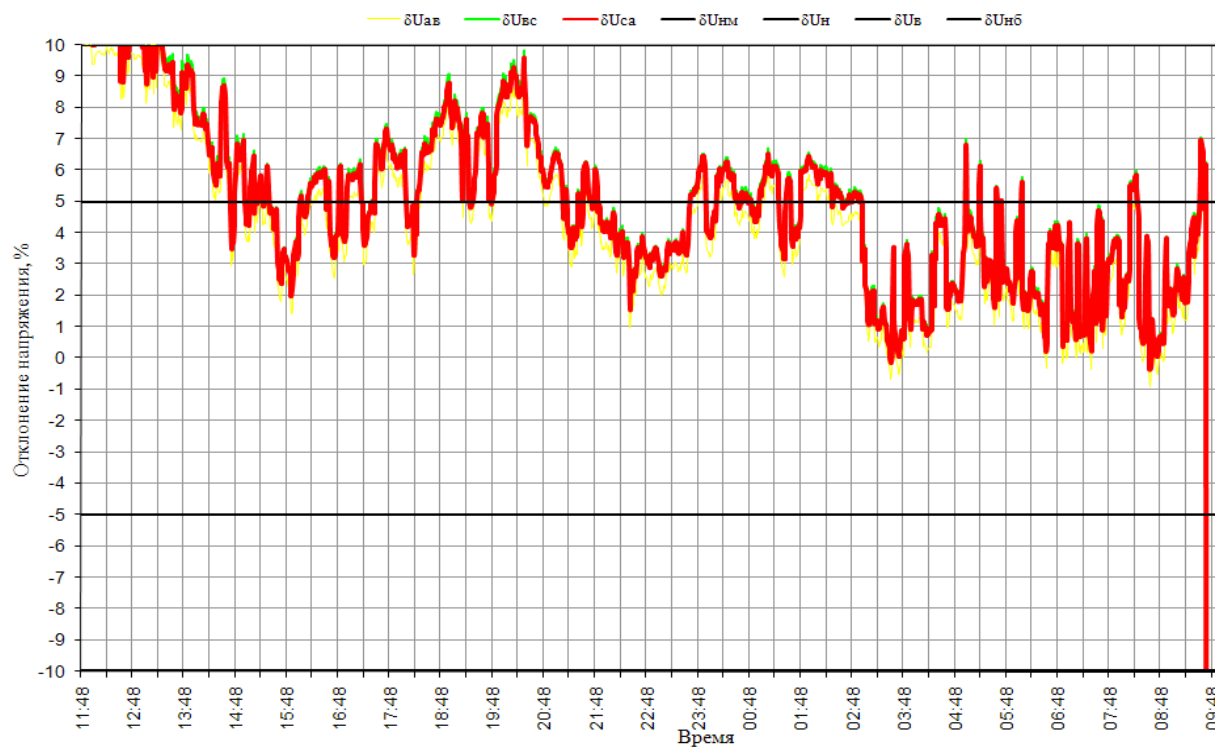


Рисунок 2.18 - Графики отклонений междуфазных напряжений по ПС-948

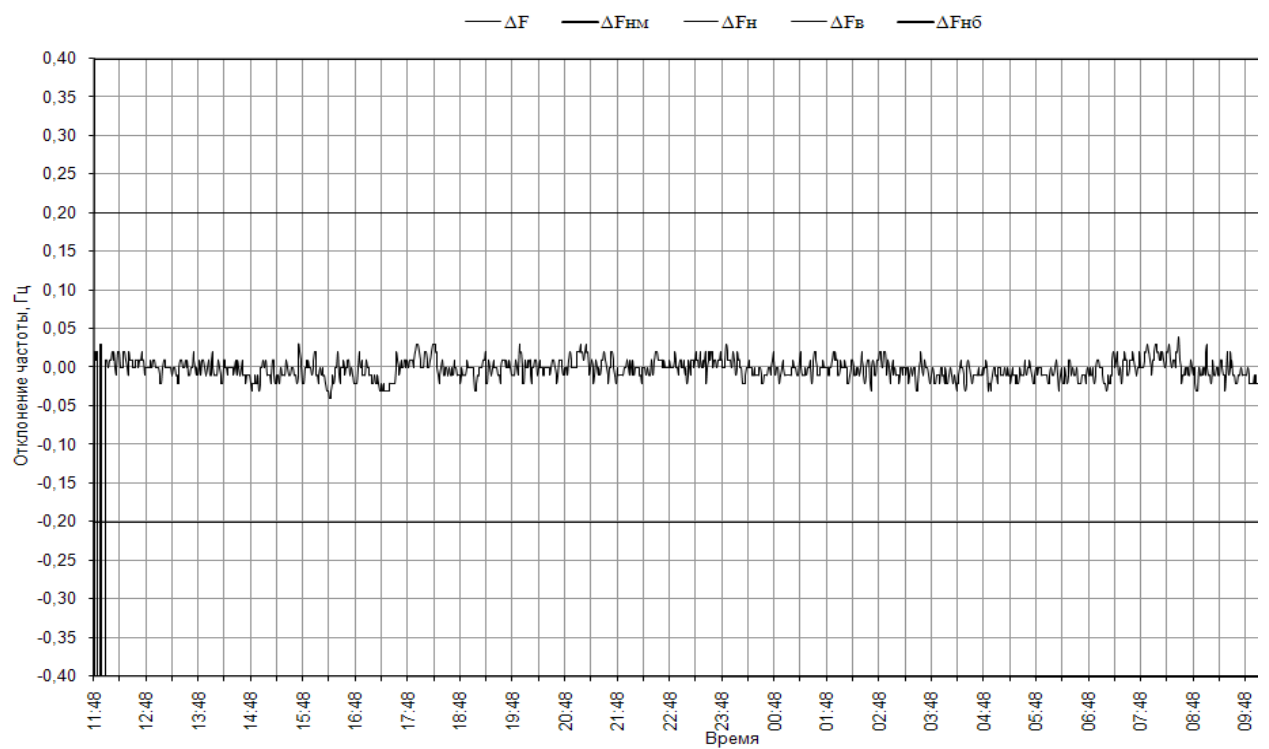


Рисунок 2.19 - График отклонения частоты по ПС-948

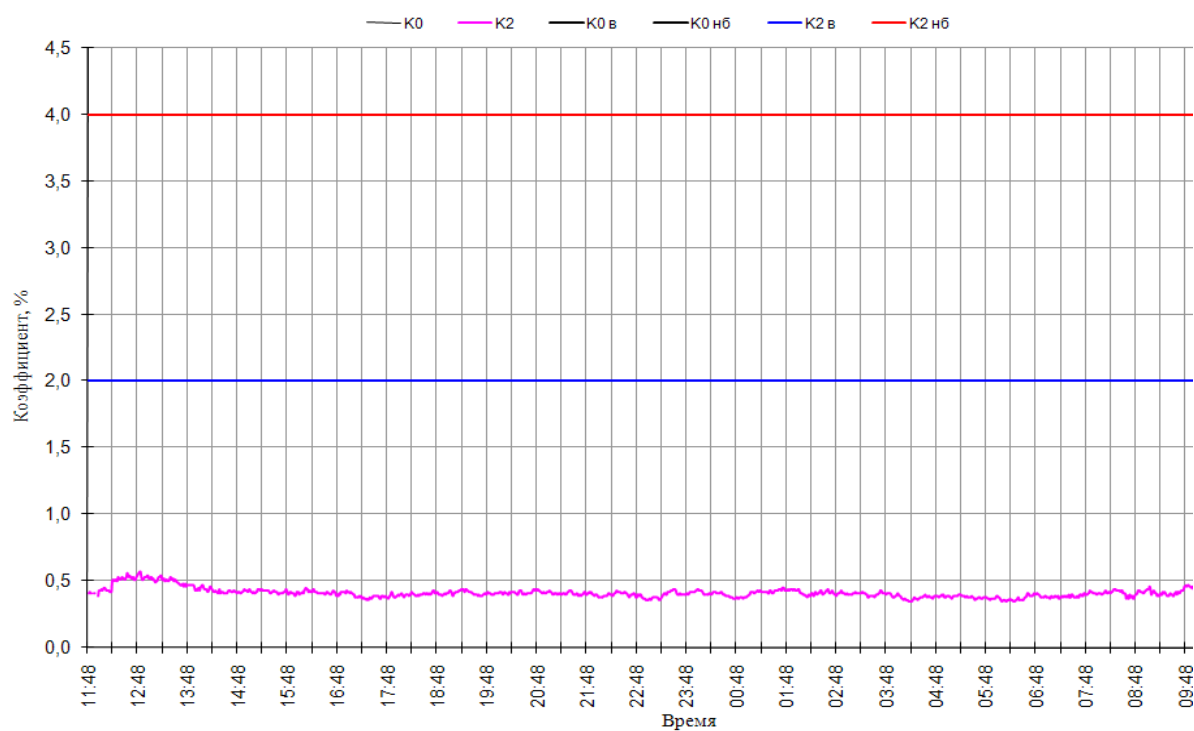


Рисунок 2.20 - Графики коэффициентов несимметрии по обратной последовательности по ПС-948

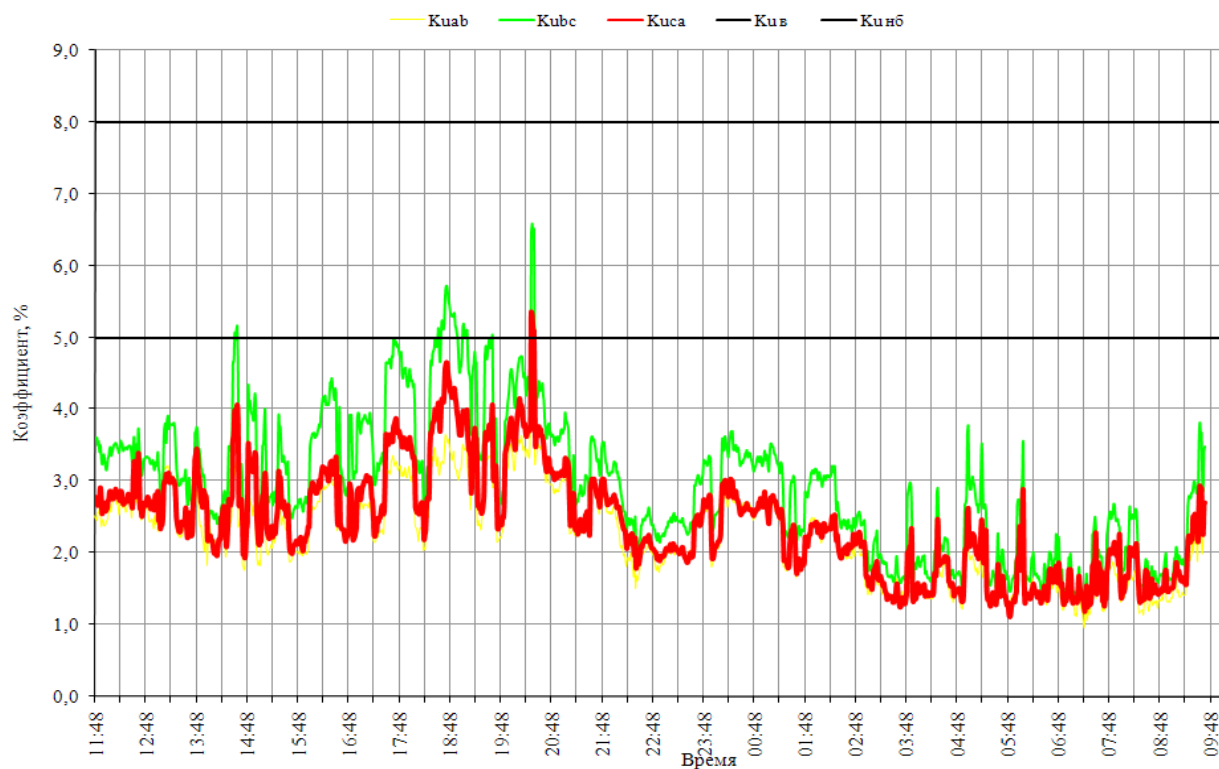


Рисунок 2.21 - Графики коэффициентов искажения синусоидальности междофазных напряжений по ПС-948

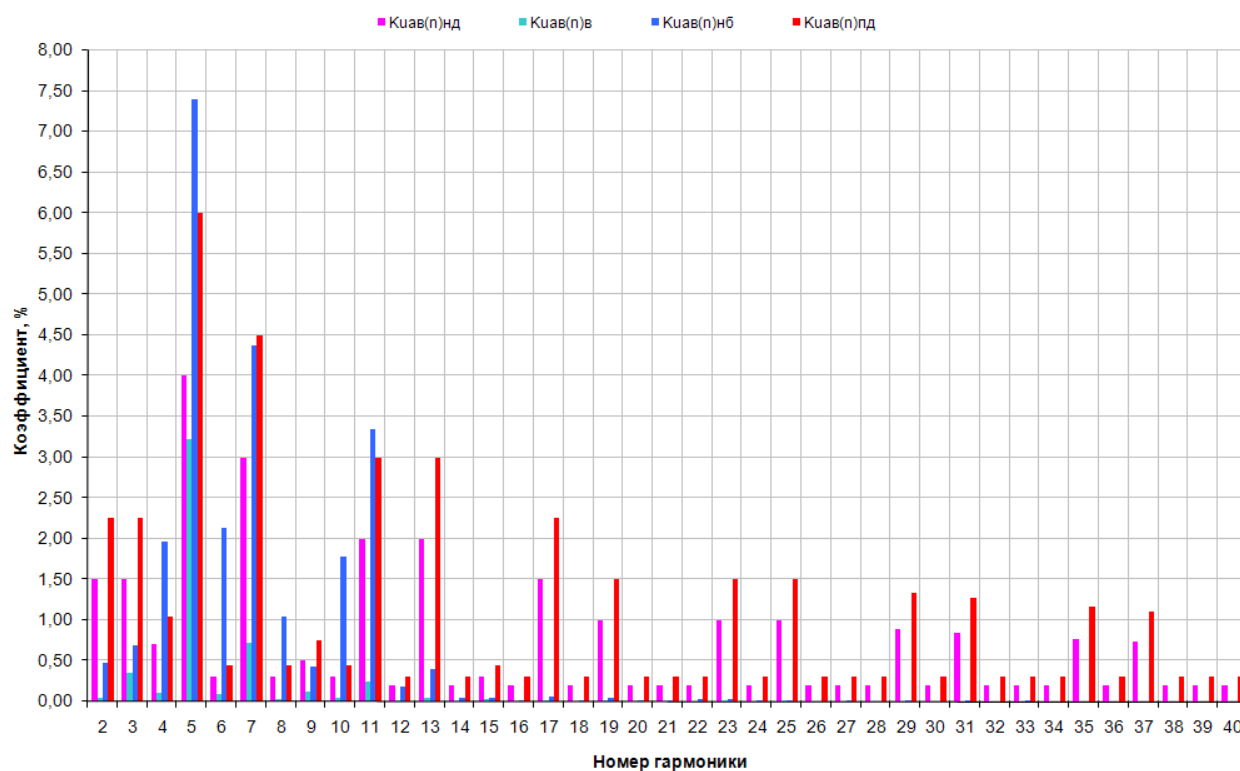


Рисунок 2.22 - Коэффициенты n-ых гармонических составляющих
напряжения $U_{ав}$ по ПС-948

- по отклонению частоты;
- по коэффициенту искажения синусоидальности напряжения;
- по коэффициенту несимметрии напряжений по обратной последовательности.

Сравнительный анализ показателей качества электроэнергии на подстанциях по коэффициенту n -й гармонической составляющей напряжения, представленный в табл. 2.2 для нечетных гармоник, показал, что практически по всему спектру гармонического состава наблюдается превышения допустимых значений, что является нарушением ГОСТ. Особенно это характерно для 5 и 7 гармоник, значения которых значительно превышают допустимый уровень по всем подстанциям. Пятая гармоника на подстанции ПС-12 превышает допустимый уровень в 1,5 раза, на подстанции ПС-910 в 1,65 раза, на подстанции ПС-948 в 1,85 раза. Соответственно седьмая гармоника на подстанции ПС-12 превышает допустимый уровень в 2,53 раза, на подстанции ПС-910 в 1,5 раза, на подстанции ПС-948 в 1,5 раза. Сравнительный анализ фактических и нормируемых значений по коэффициенту n -й гармонической составляющей напряжения представлен на рис. 2.23 [86].

Согласно ГОСТ 32144-2013 одним из важных показателей качества электроэнергии (ПКЭ), относящихся к гармоническим составляющим напряжения, является суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения (СКГСН) или Total Harmonic Distortion Voltage (THD(U)). Данный параметр может быть определен как:

$$THD(U) = \sqrt{\sum_{n=2}^{40} \frac{U_n^2}{U_1^2}} \times 100\%,$$

где: U_n - уровень напряжения n -ной гармонической составляющей; U_1 - уровень напряжения первой гармоники. Этот же ГОСТ вводит ограничения для параметра (THD(U)), который не должен превышать значения 5% (уровень напряжения 6 кВ).

Таблица 2.2 - Сравнительный анализ фактических и нормируемых значений по коэффициенту n-й гармонической составляющей напряжения

Номер гармоники	Допустимые значения ГОСТ 32144-2103, 6 кВ, HD(U), %	ПС-12	ПС-910	ПС-948
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
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
THD (U), %	5,00	13,48	10,77	11,80

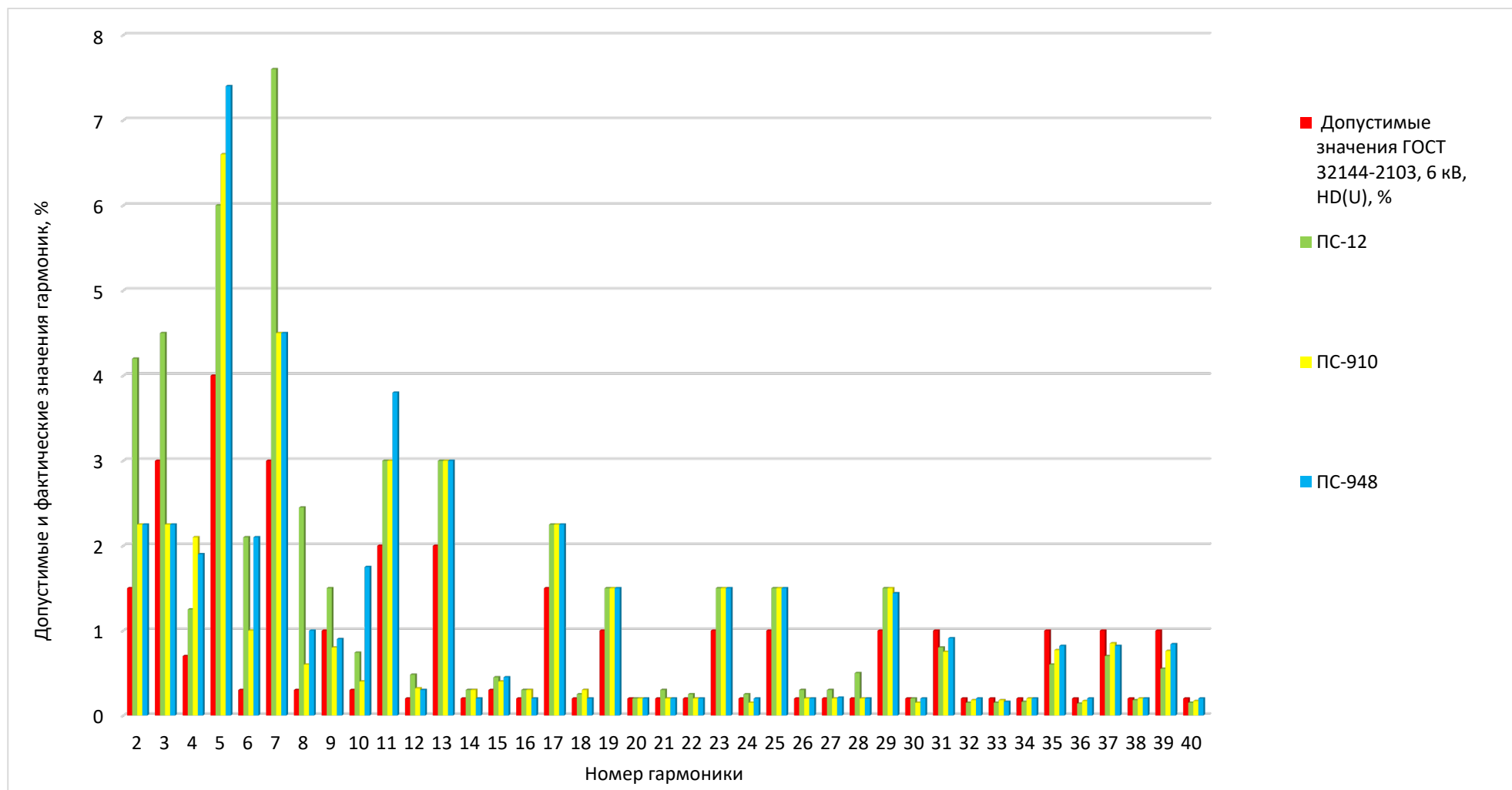


Рисунок 2.23 - Сравнительный анализ фактических и нормируемых значений по коэффициенту n-й гармонической составляющей напряжения

Сравнительный анализ фактических и нормируемых значений по суммарному коэффициенту гармонической составляющей напряжения, представленный в табл. 2.3 и на рис. 2.24., показал, что при нормируемой величине 5% фактическое значение коэффициента на подстанциях соответственно превышает 2,7 раза (ПС-12), в 2,15 (ПС-910) и 2,36 раза (ПС-948) [86].

Таблица 2.3 – Сравнительный анализ фактических и нормируемых значений по суммарному коэффициенту гармонической составляющей напряжения

Показатель	Допустимые пределы ГОСТ 32144-2103, уровень напряжения 6 кВ	ПС-12	ПС-910	ПС-948
THD (U), %	5,00	13,48	10,77	11,80

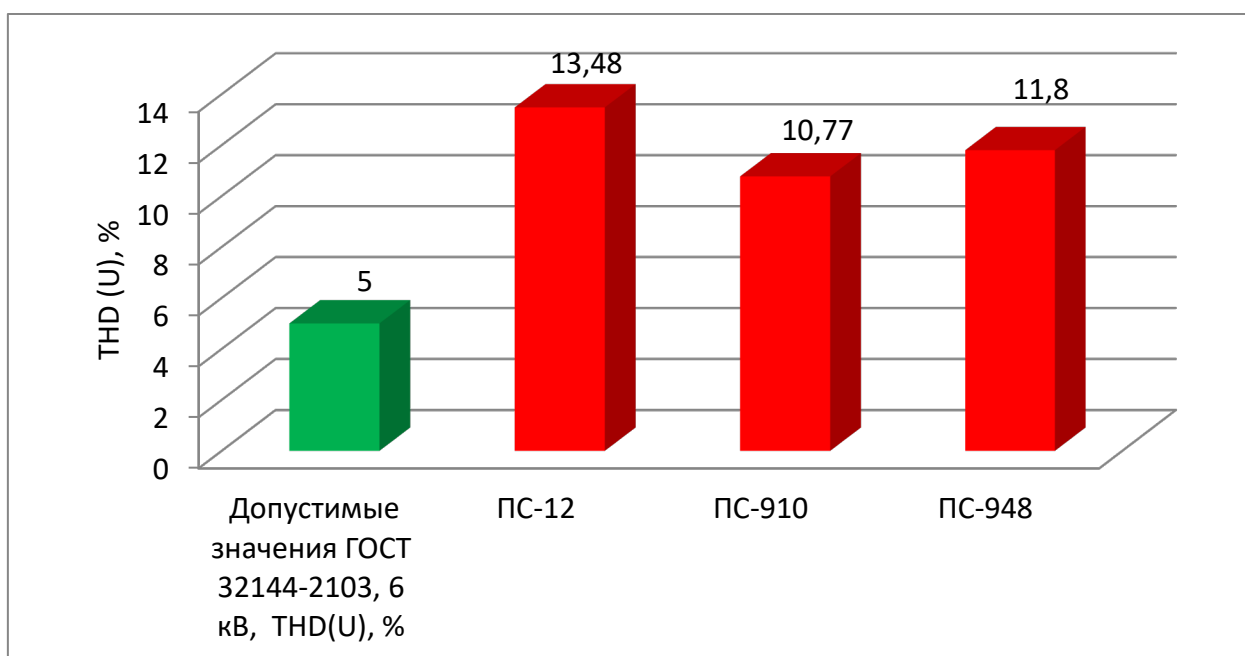


Рисунок 2.24 - Сравнительный анализ фактических и нормируемых значений по суммарному коэффициенту гармонической составляющей напряжения

Анализ показал, что наибольшее появление вышеперечисленных гармоник происходит при снижении нагрузки предприятия (ремонтные смены), а также при пусках основного технологического оборудования. Это свидетельствует о том, что наибольшее искажение обусловлено оборудованием, имеющем в своем составе преобразовательные устройства [63].

2.4 Экспериментальные исследования и анализ качества электроэнергии в подземных электрических сетях выемочных участков

Результаты экспериментальных исследований гармонического состава в подземных электрических сетях шахтах «Полысаевская» и «С.М. Кирова» представлены в табл. 2.4.

Сравнительный анализ фактических и нормируемых значений по коэффициенту n -й гармонической составляющей напряжения в подземных сетях представлен на рис. 2.25.

Анализ результатов проведенных экспериментальных исследований позволил сделать заключение, что часть показателей качества электрической энергии соответствуют ГОСТ (отклонению частоты, провалам напряжения и т.д.), а также о значительном превышении нормируемых величин по коэффициентам n -ых гармонических составляющих напряжения $U_{ав}$ по выемочному участку как по шахте «Полысаевская», так и по шахте «С.М. Кирова». Следует отметить, что в спектре гармонических составляющих значительное превышение допустимых ГОСТ значений имеют 5 и 7 гармоники (рис. 2.25). Это обусловлено применением в системах управления электроприводов горных машин и установок трехфазных выпрямителей (управляемых, неуправляемых, активных) с числом пульсаций, равным 6 [83, 86]. Сравнительный анализ фактических и нормируемых значений по коэффициенту n -й гармонической составляющей напряжения представлен на рис. 2.26 (табл. 2.5). Следует отметить, что ГОСТ 32144 – 2013 также регламентирует значение суммарных коэффициентов гармонических составляющих, которое не должно превышать 5% для напряжения 6 кВ. Сравнительный анализ фактических и нормируемых значений по суммарному коэффициенту гармонической составляющей напряжения показал, что при нормируемой величине 5% превышение фактического значения коэффициента составляет соответственно по шахте «им. С.М. Кирова» - 2,14 раза, по шахте «Полысаевская» - 2,26 раза. [83, 86].

Таблица 2.4 - Сравнительный анализ фактических и нормируемых значений по коэффициенту n-й гармонической составляющей напряжения

Номер гармоники	Допустимые значения ГОСТ 32144-2103, 6 кВ, HD(U), %	Выемочной участок шахты «С.М. Кирова», HD(U) фаза А, %	Выемочной участок шахты «С.М. Кирова», HD(U) фаза С, %	Выемочной участок шахты «Полысаевская», HD(U) фаза А, %	Выемочной участок шахты «Полысаевская», HD(U) фаза С, %
1	2	3	4	5	6
2	1,5	1,65	1,64	2,81	2,78
3	3	3,56	3,53	3,81	3,78
4	0,7	0,98	0,97	1,69	1,67
5	4	6,98	6,92	7,61	7,54
6	0,3	0,32	0,32	1,22	1,21
7	3	5,48	5,43	4,63	4,59
8	0,3	0,28	0,28	0,69	0,68
9	1	0,89	0,88	0,81	0,80
10	0,3	0,27	0,27	0,49	0,49
11	2	2,44	2,42	3,13	3,10
12	0,2	0,17	0,17	0,56	0,55
13	2	2,66	2,64	2,19	2,17
14	0,2	0,16	0,16	0,41	0,41
15	0,3	0,29	0,29	0,36	0,36
16	0,2	0,16	0,16	0,31	0,31
17	1,5	1,75	1,73	1,59	1,58
18	0,2	0,16	0,16	0,16	0,16
19	1	0,98	0,97	0,88	0,87
20	0,2	0,16	0,16	0,18	0,18
21	0,2	0,15	0,15	0,16	0,16
22	0,2	0,18	0,18	0,24	0,24

Продолжение табл. 2.4

1	2	3	4	5	6
23	1	0,96	0,95	0,95	0,94
24	0,2	0,18	0,18	0,24	0,24
25	1	0,32	0,32	0,86	0,85
26	0,2	0,18	0,18	0,16	0,16
27	0,2	0,34	0,34	0,16	0,16
28	0,2	0,16	0,16	0,21	0,21
29	1	0,41	0,41	0,08	0,08
30	0,2	0,15	0,15	0,18	0,18
31	1	0,66	0,65	0,45	0,45
32	0,2	0,14	0,14	0,16	0,16
33	0,2	0,11	0,11	0,18	0,18
34	0,2	0,17	0,17	0,16	0,16
35	1	0,57	0,56	0,68	0,67
36	0,2	0,16	0,16	0,11	0,11
37	1	0,51	0,51	0,84	0,83
38	0,2	0,11	0,11	0,17	0,17
39	1	0,23	0,23	0,46	0,46
40	0,2	0,14	0,14	0,16	0,16

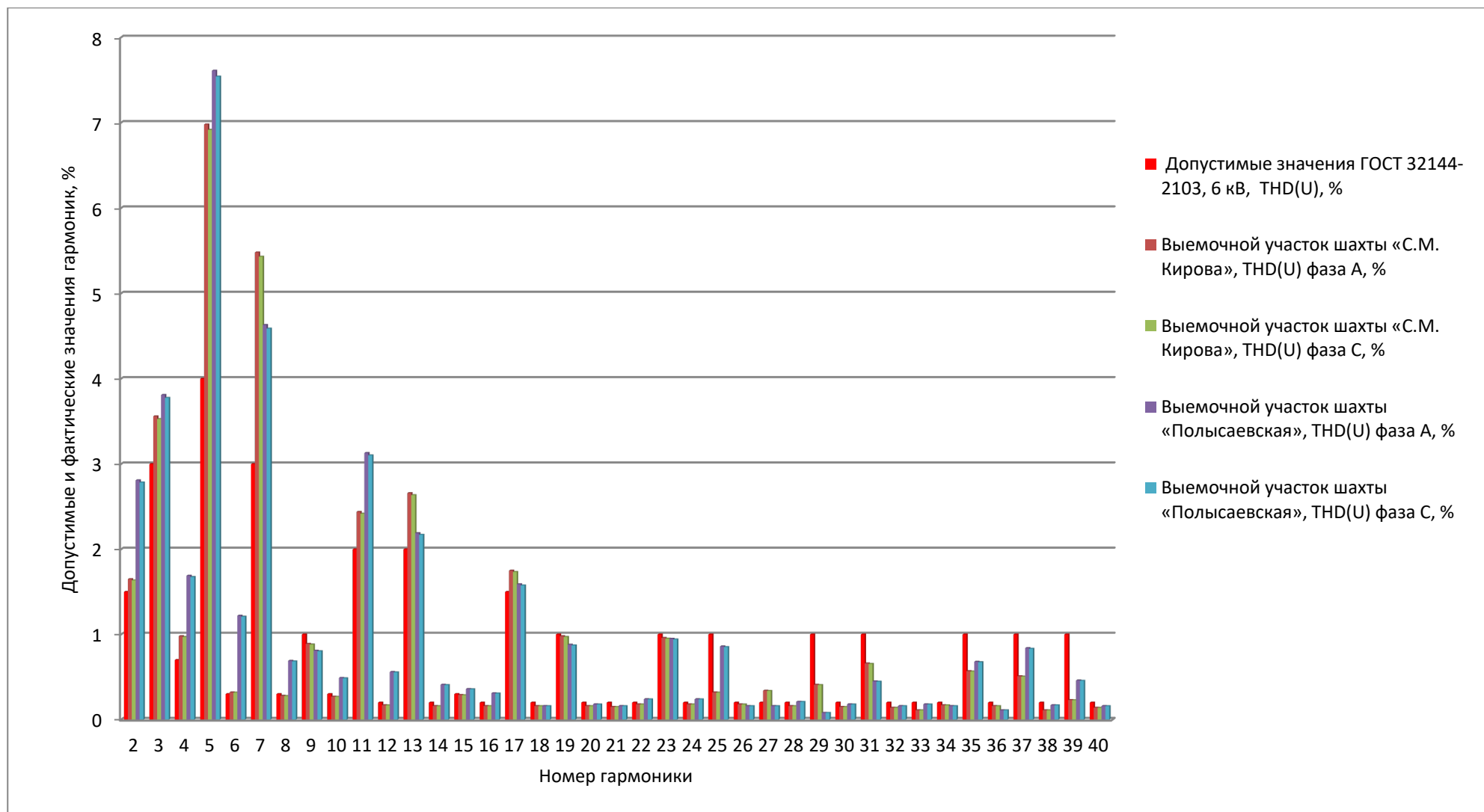


Рисунок 2.25 - Сравнительный анализ фактических и нормируемых значений по коэффициенту n-й гармонической составляющей напряжения в подземных сетях

Таблица 2.5 – Сравнительный анализ фактических и нормируемых значений по суммарному коэффициенту гармонической составляющей напряжения

Показатель	Допустимые пределы ГОСТ 32144-2103, уровень напряжения 6 кВ	Выемочной участок шахты «С.М. Кирова»	Выемочной участок шахты «Полысаевская»
Суммарное значение напряжений гармонических составляющих (THD (U))	5%	10,72%	11,31%

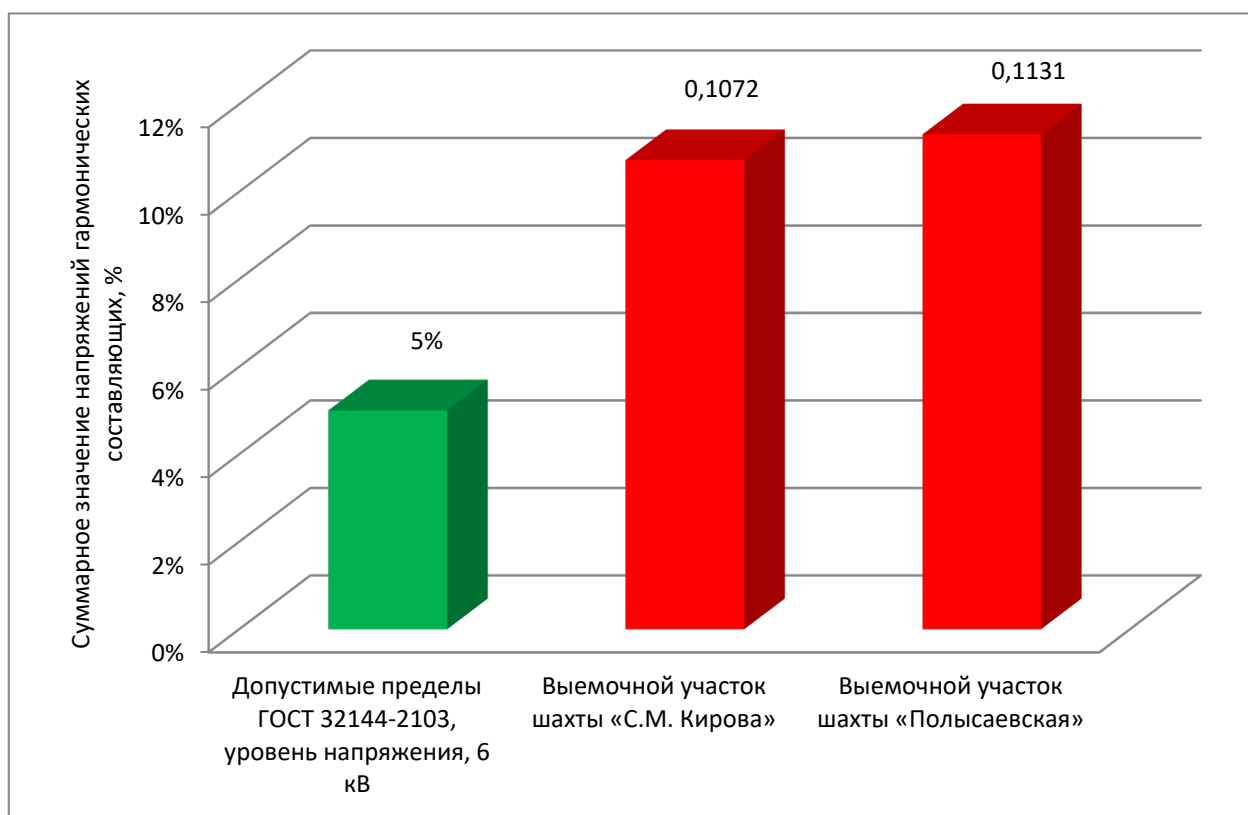


Рисунок 2.26 - Сравнительный анализ фактических и нормируемых значений по суммарному коэффициенту гармонической составляющей напряжения

На рис. 2.27 представлены результаты измерения значений напряжения и тока на входе участковой подстанции, а на рис.2.28 результаты измерения значений коэффициента мощности $\cos \varphi$ высокопроизводительного выемочного участка шахты «Полысаевская».

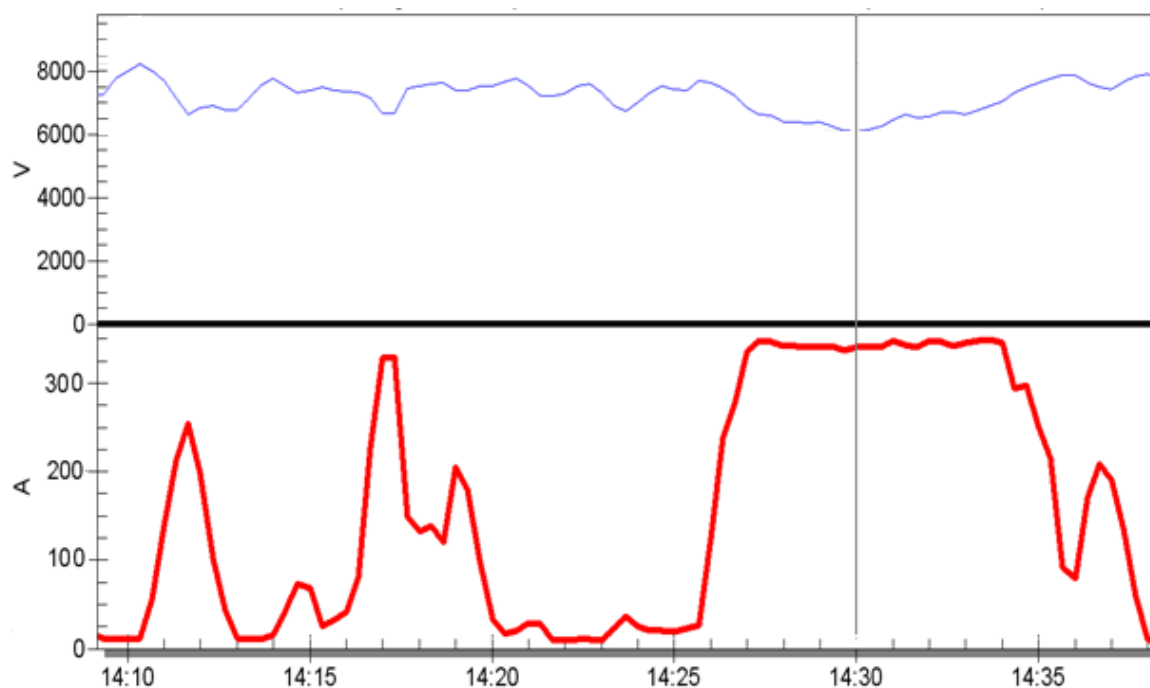


Рисунок 2.27 – Действующее значение напряжение и тока
на входе участковой подстанции

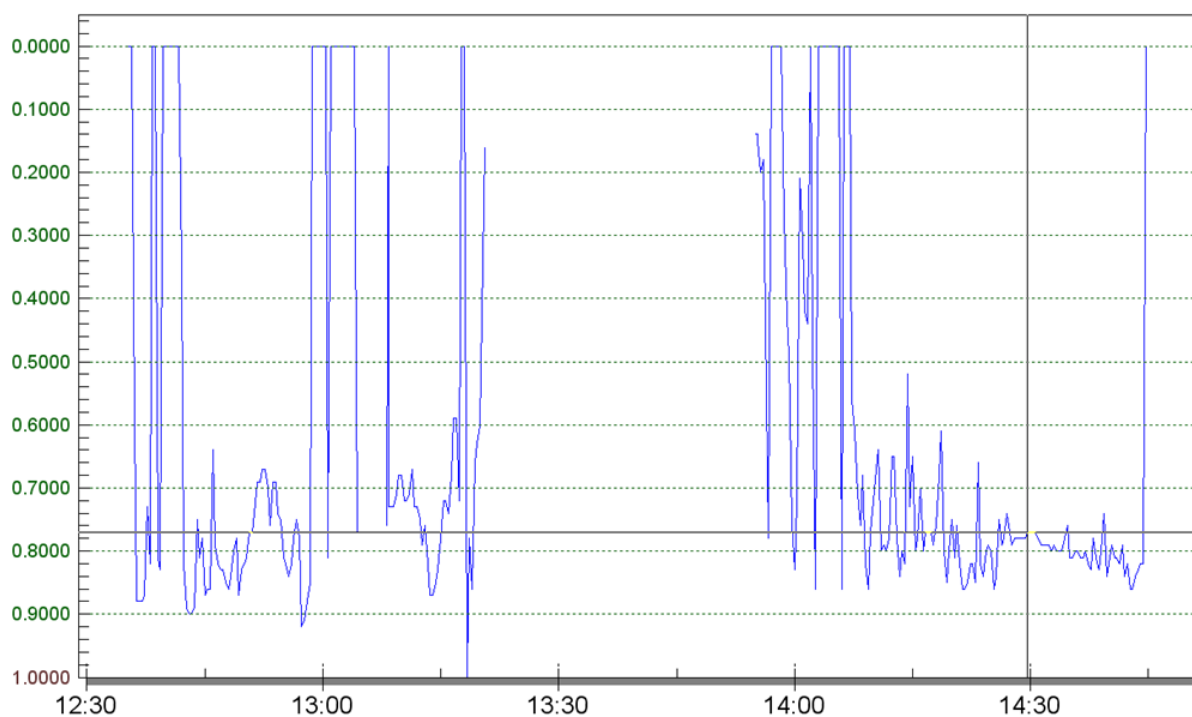


Рисунок 2.28 - Значения коэффициента мощности $\cos \varphi$
высокопроизводительного выемочного участка шахты «Полысаевская»

Анализ результатов измерений коэффициента мощности показал, что фактическое среднее значение данного параметра составляет 0,77 и является ниже допустимого, что требует определенной корректировки в сторону увеличения за счет применения определенных технических средств.

2.5 Выводы

Исследования, проведенные в данной главе, позволяют сделать следующие выводы:

1. Впервые, для условий подземных участковых электрических сетей угольных шахт высокой производительности проведен анализ влияния преобразовательных устройств на сеть, являющихся причиной появления высших гармонических составляющих, оказывающих негативное влияние на работу электрооборудования.
2. Преобладание 5 и 7 гармоник свидетельствует о наличии достаточно большого числа преобразовательных устройств на базе 6-пульсной мостовой схемы выпрямления.
3. Установлено, что фактическое значение суммарного коэффициента гармонической составляющей напряжения на подстанциях (ПС-12, ПС-910 и ПС-948) расположенных на поверхности шахт, превышает нормируемое значение соответственно в 2,7; 2,15 и 2,36 раза, а в электрических сетях подземных участков в пределах 2,14 – 2,26 раза.
4. Установлено, что фактическое значение коэффициента мощности высокопроизводительного выемочного участка составляет в среднем 0,77, что является низким и требует определенной корректировки в сторону увеличения за счет применения определенных технических средств.

Глава 3. Синтез технических устройств для повышения качества электрической энергии в условиях шахт высокой производительности

3.1 Обоснование применения технических устройств для повышения качества электрической энергии

Исследования, проведенные в предыдущей главе диссертационной работы, актуализировали необходимость разработки устройства автоматического мониторинга качества электрической энергии, в подземных электрических сетях угольных шахт [56, 62, 77]. Снижение качества электрической энергии в подземных электрических сетях угольных шахт может привести к нарушению номинальных режимов работы основного технологического оборудования, что вызовет снижение производительности, сокращение сроков службы электрооборудования из-за нарушения изоляции, нагрева, и, как следствие повышение вероятности аварий [12, 34, 35, 38, 40, 45, 52, 58, 60, 61, 68, 94, 95, 102]. Однако применение традиционных для общепромышленных предприятий способов повышения качества электрической энергии в подземных электрических сетях угольных шахт весьма затруднительно и неприемлемо [56, 62, 77]. Это обусловлено значительными отличиями горного оборудования для подземной добычи, отличием технологических операций добычи и систем транспортировки энергоресурсов в подземных условиях, а также значительным отличием аэродинамической обстановки внутри горных выработок и контролем за ней.

Решением научной задачи по повышению качества электрической энергии в подземных электрических сетях угольных шахт является возможность применения фильтров высших гармоник, которые могут быть классифицированы на активные и пассивные.

Алгоритм выбора фильтров высших гармоник для высокопроизводительных угольных шахт, в том числе опасных по внезапным выбросам газа и пыли представлен на рис. 3.1.

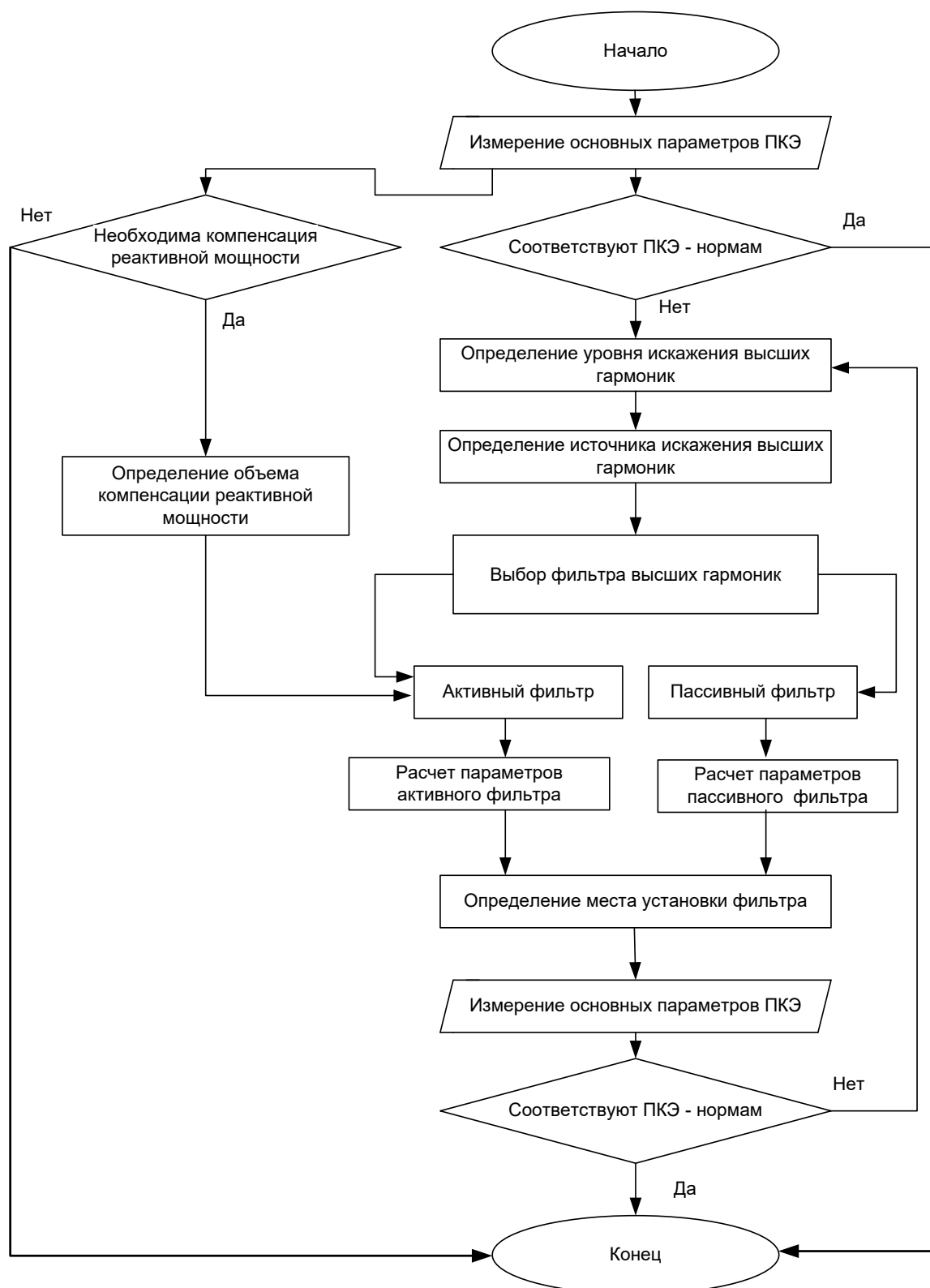


Рисунок 3.1 - Алгоритм выбора фильтров высших гармоник для высокопроизводительных угольных шахт, в том числе опасных по внезапным выбросам газа и пыли

Выбор фильтра высших гармоник, согласно представленному алгоритму, определяется коэффициентом мощности. Если коэффициент мощности требует корректировки в сторону увеличения, то предлагается к установке активный фильтр высших гармоник, если корректировки не требуется, то возможно установить ряд пассивных узкополосных фильтров или пассивный широкополосный фильтр высших гармоник.

В настоящее время наиболее перспективной системой повышения качества электрической энергии за счет снижения влияния высших гармоник на питающую сеть является активный фильтр высших гармоник [2, 3, 24, 47, 49, 92, 101]. Существует ряд схемных решений по использованию данного устройства [102]. На рис. 3.2 представлена схема трехфазного активного фильтра высших гармоник при параллельном присоединении к сети с емкостным накопителем, а на рис.3.3 с индуктивным накопителем. Используются схемы трехфазного активного фильтра высших гармоник при последовательном присоединении к сети с емкостным накопителем (рис. 3.4) и индуктивным (рис. 3.5). На рис. 3.6 представлена схема трехфазного гибридного (последовательно-параллельного) активного фильтра высших гармоник с емкостными накопителями.

Общий принцип действия активного фильтра высших гармоник состоит в активной генерации компенсирующего тока (I_{AHF}) в противофазе с током гармонических искажений нагрузки (I_{Load}), взаимной компенсации этих токов и получении в результате тока синусоидальной формы (I_{Grid}) [2, 3, 24, 47, 49, 92, 101]. Следует отметить, что все представленные схемы активных выпрямителей выполнены по трехфазной мостовой схеме с использованием полностью управляемых силовых ключей – IGBT транзисторов с встроенным демпферным диодом. Отличие схемных решений заключается в способе подключения к питающей сети, а также в накопителях энергии (емкостной или индуктивный). Анализ существующих активных фильтров высших гармоник показал, что наиболее распространённая схема при параллельном присоединении к сети с емкостным накопителем (рис. 3.2).

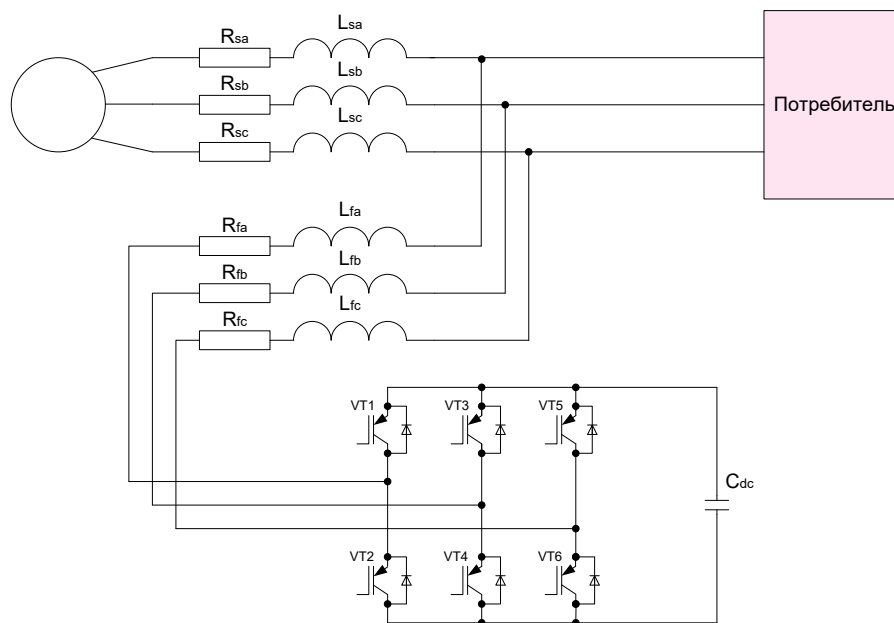


Рисунок 3.2 – Трехфазный активный фильтр высших гармоник при параллельном присоединении к сети с емкостным накопителем

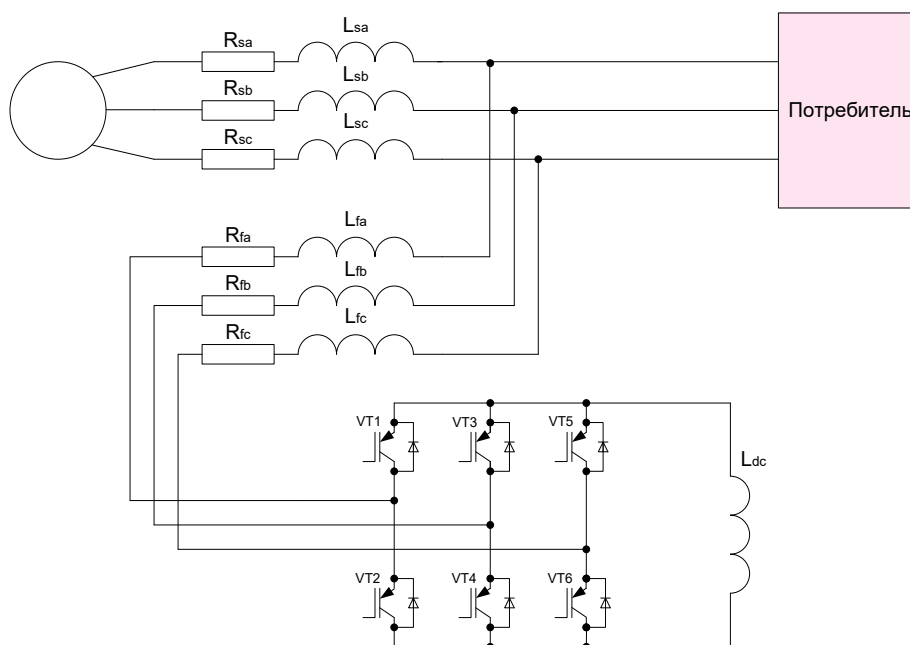


Рисунок 3.3 - Трехфазный активный фильтр высших гармоник при параллельном присоединении к сети с индуктивным накопителем

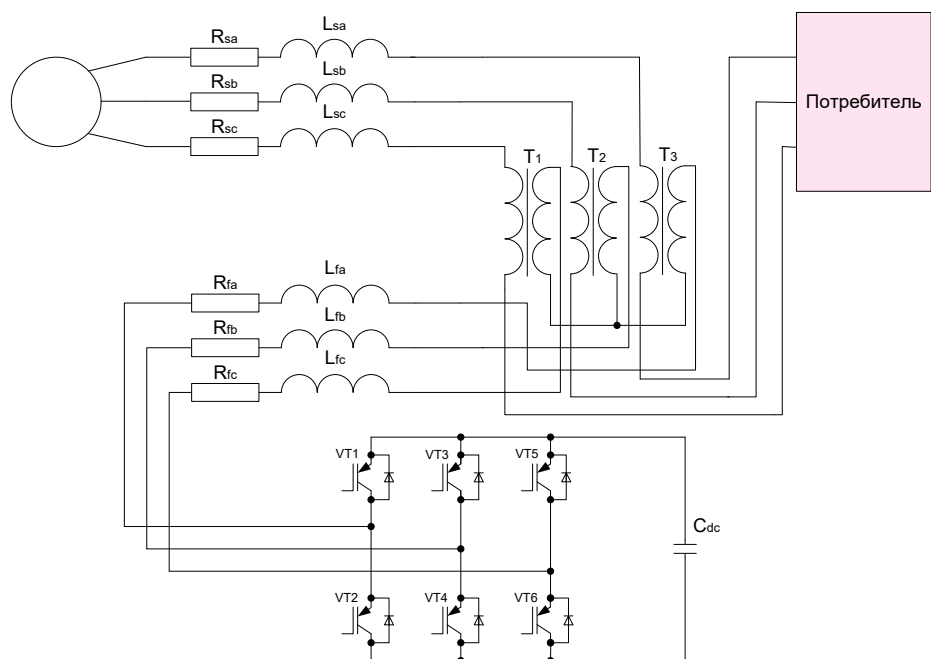


Рисунок 3.4 - Трехфазный активный фильтр высших гармоник при последовательном присоединении к сети с емкостным накопителем

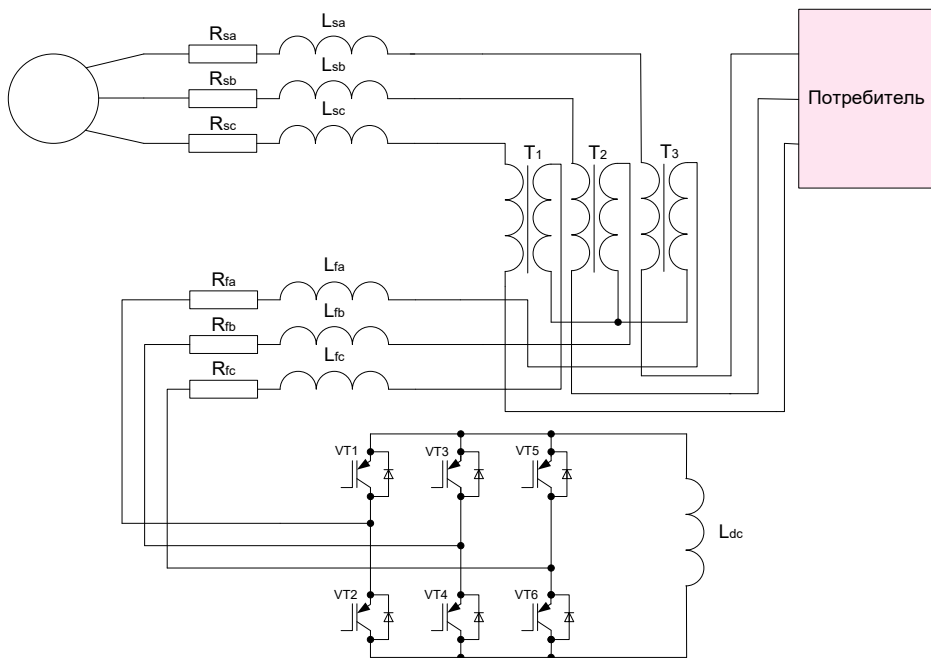


Рисунок 3.5 - Трехфазный активный фильтр высших гармоник при последовательном присоединении к сети с индуктивным накопителем

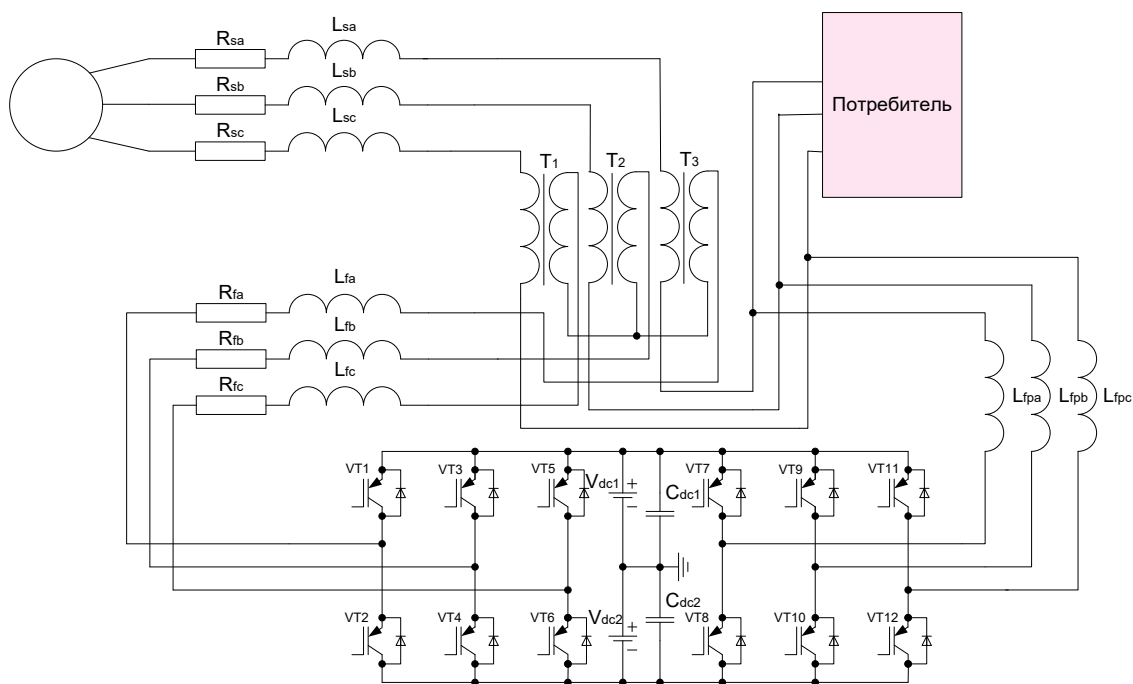


Рисунок 3.6 – Трехфазный гибридный (последовательно-параллельный) активный фильтр высших гармоник с емкостными накопителями

Выбор этой схемы активного фильтра высших гармоник при параллельном присоединении к сети с емкостным накопителем обусловлен простотой реализации. Остальные схемные решения фильтров, в настоящее время, используется не так широко.

3.2 Синтез параметров активных фильтров высших гармоник применительно к условиям высокопроизводительных угольных шахт

Структурная схема информационных потоков активного фильтра высших гармоник представлена на рис. 3.7. Согласно этой схеме, в качестве информационных потоков выступают следующие потоки информации – уровень токов на источнике (i_{as} , i_{bs} , i_{cs}), уровни тока на нагрузке (i_a , i_b , i_c), а также уровни напряжения на нагрузке (u_a , u_b , u_c). В частности, сигналы по току с источника поступают в систему управления силовыми ключами активного фильтра высших гармоник. В данную систему также поступает сигнал от вычислителя заданных токов, на который, в свою очередь, поступают сигналы по уровням тока и напряжения от нагрузки. В системе управления силовыми ключами осуществляется процесс сравнения этих сигналов и формирование с помощью релейных регуляторов сигналов управления IGBT, на которых выполнен активный фильтр.

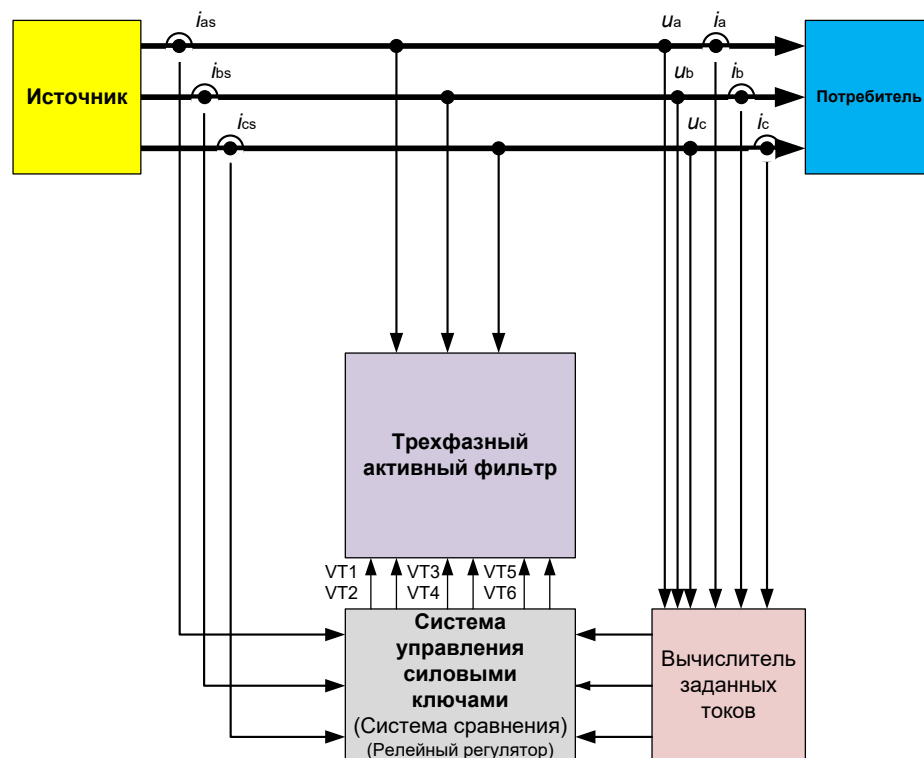


Рисунок 3.7 – Структурная схема информационных потоков активного фильтра высших гармоник

В настоящее время, расчет параметров активного фильтра высших гармоник, осуществляется с использованием Теории мгновенной мощности или Преобразованием Кларка.

Согласно теории мгновенной мощности (p-q Теория), которая представлена в ряде работ, происходит определение мгновенной мощности во временной области путем трансформирования напряжения и токов в трехфазной системе (координаты a, b, c) в систему координат α , β , 0, которое называется Преобразованием Кларка [16, 26, 102]. Прямое и обратное преобразования для напряжений и тока выглядят следующим образом:

Прямое преобразование Кларка для напряжений:

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \\ u_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix}. \quad (3.1)$$

Обратное преобразование Кларка для напряжений:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \sqrt{\frac{1}{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \sqrt{\frac{1}{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \\ u_0 \end{bmatrix}. \quad (3.2)$$

Прямое преобразование Кларка для токов:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}. \quad (3.3)$$

Обратное преобразование Кларка для токов:

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \sqrt{\frac{1}{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \sqrt{\frac{1}{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix}. \quad (3.4)$$

Учитывая, что в специфических условиях угольных шахт используется изолированная нейтраль и отсутствует нулевой проводник, преобразование Кларка приобретают иной вид.

Прямое преобразование Кларка для напряжений в подземных сетях угольных шахт:

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix}. \quad (3.5)$$

Обратное преобразование Кларка для напряжений в подземных сетях угольных шахт:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix}. \quad (3.6)$$

Прямое преобразование Кларка для тока в подземных сетях угольных шахт:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}. \quad (3.7)$$

Обратное преобразование Кларка для тока в подземных сетях угольных шахт:

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}. \quad (3.8)$$

Согласно преобразованию Кларка, мгновенные значения фазного напряжения и тока являются проекциями соответствующих вращающихся векторов на неподвижные оси a, b, c смещенных относительно друг друга на 120° и неподвижных осей α и β расположенных под углом 90° друг к другу. Визуализированное преобразование Кларка для напряжения u_a представлены на рис. 3.8, для напряжения u_b - на рис. 3.9, для напряжения u_c представлены на рис. 3.10.

Мгновенную полную мощность в комплексном виде определяют как:

$$\begin{aligned} s &= \bar{u} \cdot i^* = (u_\alpha + ju_\beta) \cdot (i_\alpha - ji_\beta) = (u_\alpha i_\alpha + u_\beta i_\beta) + \\ &+ j(u_\beta i_\alpha - u_\alpha i_\beta), \\ p &= u_\alpha i_\alpha + u_\beta i_\beta = \bar{p} + \tilde{p}, \\ q &= u_\beta i_\alpha - u_\alpha i_\beta = \bar{q} + \tilde{q}, \end{aligned} \quad (3.9)$$

где: p – мгновенная вещественная (активная) мощность; q – мгновенная мнимая (реактивная) мощность; $\bar{p}$ – среднее значение потока энергии в единицу времени (активная мощность); $\tilde{p}$ – пульсирующая часть потока энергии в единицу времени (среднее значение равно 0); $\bar{q}$ – среднее значение потока энергии в единицу времени (реактивная мощность (мнимая мощность)); $\tilde{q}$ – пульсирующая (колебательная) часть мнимой мощности, соответствует энергии, которой обмениваются фазы нагрузки.

Уровни токов, в матричной форме, в координатах α и β определяются как:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \begin{bmatrix} u_\alpha & u_\beta \\ u_\alpha & -u_\beta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

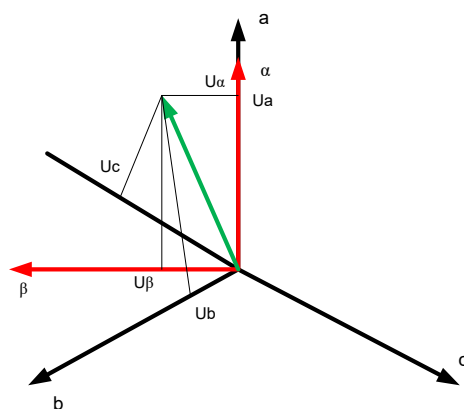


Рисунок 3.8 – Преобразование Кларка для напряжения
(Положение вектора 1)

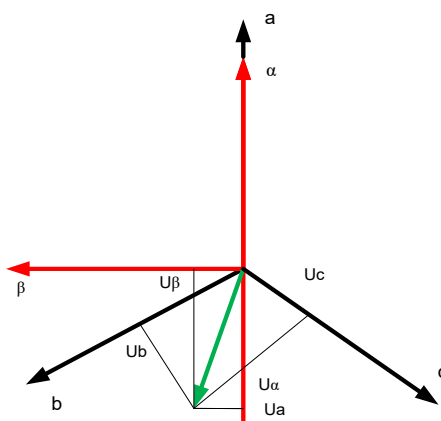


Рисунок 3.9 – Преобразование Кларка для напряжения
(Положение вектора 2)

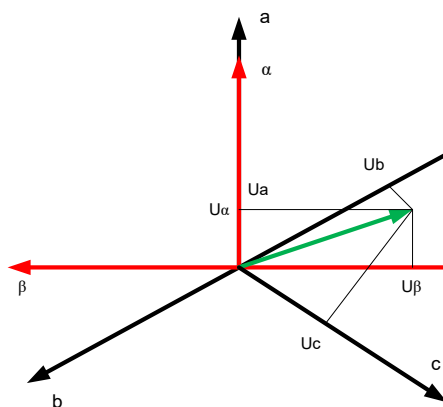


Рисунок 3.10 – Преобразование Кларка для напряжения
(Положение вектора 3)

Уровни токов в координатах α и β определяются как:

$$\begin{aligned} i_{\alpha} &= \frac{u_{\alpha}}{u_{\alpha}^2 + u_{\beta}^2} \bar{p} + \frac{u_{\alpha}}{u_{\alpha}^2 + u_{\beta}^2} \tilde{p} + \frac{u_{\alpha}}{u_{\alpha}^2 + u_{\beta}^2} \bar{q} + \frac{u_{\alpha}}{u_{\alpha}^2 + u_{\beta}^2} \tilde{q}, \\ i_{\beta} &= \frac{u_{\beta}}{u_{\alpha}^2 + u_{\beta}^2} \bar{p} + \frac{u_{\beta}}{u_{\alpha}^2 + u_{\beta}^2} \tilde{p} - \frac{u_{\beta}}{u_{\alpha}^2 + u_{\beta}^2} \bar{q} - \frac{u_{\beta}}{u_{\alpha}^2 + u_{\beta}^2} \tilde{q}. \end{aligned} \quad (3.11)$$

Используя изложенный математический аппарат, разработана последовательность вычисления управляющих сигналов активного фильтра представленная на рис. 3.11.

Последовательность вычисления включает семь блоков, которые обеспечивают процесс формирования сигналов управления транзисторами активного фильтра:

- первый блок обеспечивает преобразование тока и напряжения на нагрузке;
- второй блок обеспечивает вычисление параметров активной и реактивной мощности в двухмерной системе координат (α, β) ;
- третий блок обеспечивает определение объемов и необходимости компенсации реактивной мощности в системе электроснабжения;
- четвертый блок позволяет вычислить параметров тока в двухмерной системе координат (α, β) при учете компенсации реактивной мощности;
- пятый блок обеспечивает обратное преобразование Кларка для токов двухмерной системы координат (α, β) при учете компенсации активной и реактивной мощности;
- шестой блок формирует разность между токами в нагрузке и токами прошедшими пять предыдущих этапов вычисления;
- седьмой блок осуществляет сравнение токов нагрузки и токов после предыдущих этапов вычисления, а также осуществляет формирование сигналов управления биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT) активного фильтра высших гармоник.

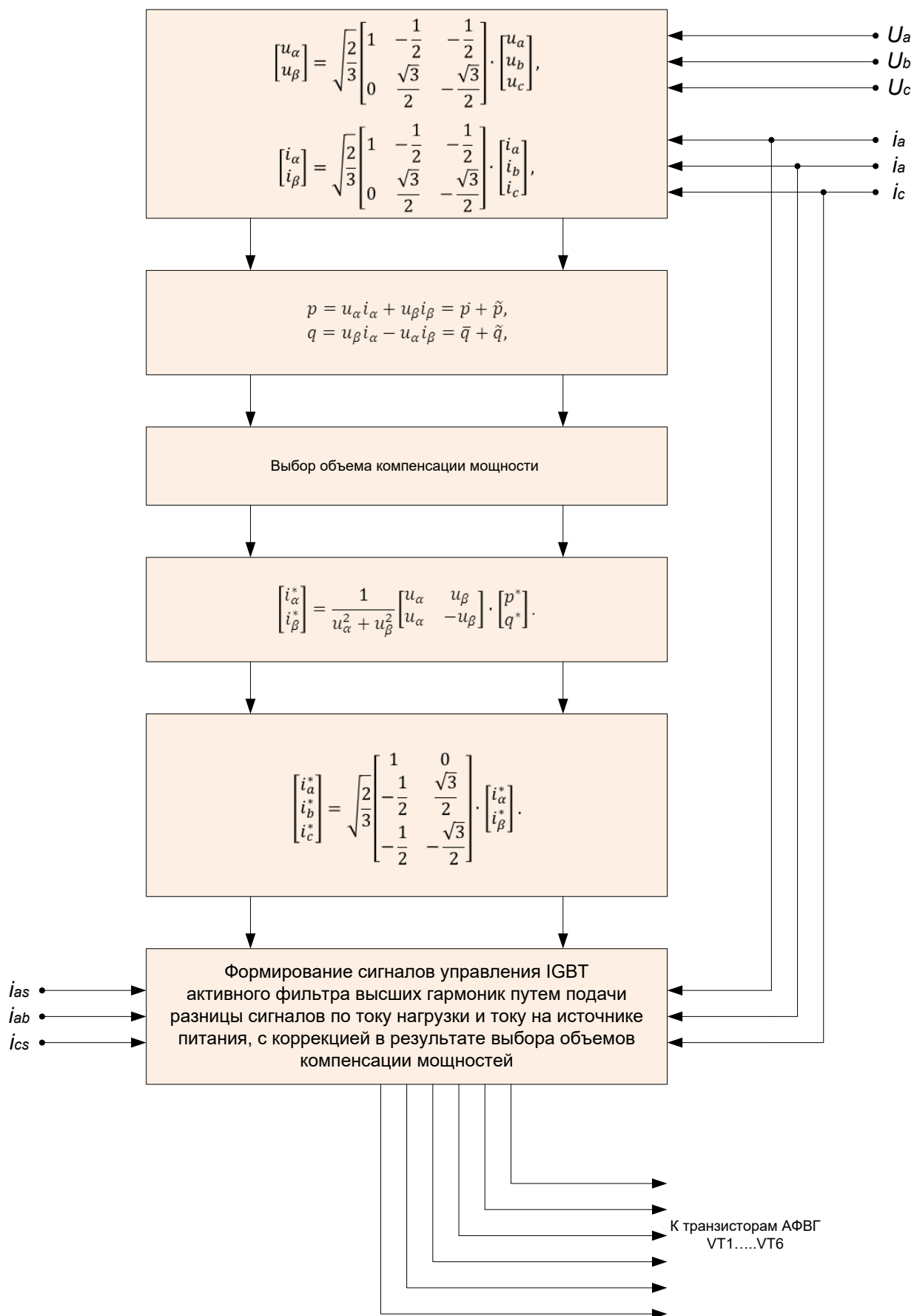


Рисунок 3.11 – Последовательность вычисления управляющих сигналов активного фильтра

Следует отметить, что в дальнейшем необходимо произвести расчет параметров накопительной емкости активного фильтра высших гармоник, а также необходимо произвести расчет параметров входного дросселя активного фильтра высших гармоник для различных уровней напряжения имеющих в подземных электрических сетях угольных шахт.

Величину ёмкости накопительного конденсатора активного фильтра высших гармоник, возможно определить как:

$$C = 2 \frac{\int_0^{T/12} (T_u + P_A) dt}{\Delta U_{dc} (\Delta U_{dc} + 2U_{dc})}, \quad (3.12)$$

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} – величина изменений выпрямленного напряжения, В; U_{dc} – величина выпрямленного напряжения, В.

Для определения емкости накопительного конденсатора активного фильтра высших гармоник принимаем следующие допущения:

$$T_u = \sqrt{3}U \cdot \sum_{n=2}^{40} I_n \quad (3.13)$$

$$U = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot I}, \quad (3.14)$$

$$P_A = P_{cond} + P_{sw} = i_c \cdot u_{ce} + \frac{1}{2} U_{CEmax} \cdot I_{Cmax}, \quad (3.15)$$

$$\Delta U_{dc} = 0,05 U_{dc}; \quad (3.16)$$

где: U – действующее напряжение первой гармоники, В; I – действующее значение тока первой гармоники, А; U_n – уровень напряжения n – ной гармонической составляющей, В; P_{cond} – мощность статических потерь на IGBT, ВА; P_{sw} – мощность динамических потерь на IGBT, ВА; i_c – мгновенное значение тока коллектора IGBT, А; u_{ce} – мгновенное значение напряжения эмиттер - коллектор IGBT, В; U_{CEmax} – максимальное значение напряжения эмиттер - коллектор IGBT, В; I_{Cmax} – максимальное значение тока

коллектора IGBT, А. При этом результирующая формула по расчету накопительной емкости активного фильтра высших гармоник, для распределительных сетей высокопроизводительных угольных шахт примет следующий вид:

$$C = 2 \frac{\int_0^{T/12} \left(\frac{S}{I} \cdot \sum_{n=2}^{40} I_n + (i_c \cdot u_{ce} + \frac{1}{2} U_{CEmax} \cdot I_{Cmax}) \right) dt}{\Delta U_{dc} (\Delta U_{dc} + 2U_{dc})}.$$

В качестве исследуемых IGBT элементов использовались транзисторы на разные уровни напряжения представленные в табл. 3.1.

Таблица 3.1 – Названия IGBT

№	Уровень напряжения IGBT, В	Марка транзистора	Производитель
1	380	LGD8501TH	LITTELFUSE
2	660	IRGB200B60PD	International Rectifier
3	1140	SGW250N120	Infineon
4	3300	IXEL40N440	IXUS
5	6600	CM750HG-130R	Mitsubishi Electric

Уровни линейного напряжения в подземных электрических сетях угольных шахт: $U_{л1} = 380$ В; $U_{л2} = 660$ В; $U_{л3} = 1140$ В; $U_{л4} = 3300$ В; $U_{л5} = 6600$ В, тогда как уровни выпрямленного напряжения в активном фильтре высших гармоник будет составлять:

$$\begin{aligned}
 U_{dc1} &= 1,35 \cdot U_{л1} = 513 \text{ В;} \\
 U_{dc2} &= 1,35 \cdot U_{л2} = 891 \text{ В;} \\
 U_{dc3} &= 1,35 \cdot U_{л3} = 1539 \text{ В;} \\
 U_{dc4} &= 1,35 \cdot U_{л4} = 4455 \text{ В;} \\
 U_{dc5} &= 1,35 \cdot U_{л5} = 8910 \text{ В.}
 \end{aligned}
 \tag{3.17}$$

Результаты расчета накопительной емкости активного фильтра высших гармоник для уровней напряжения питающих распределительные сети высокопроизводительных угольных шахт представлен в табл. 3.2 и на рис. 3.12, рис. 3.13.

Таблица 3.2 - Результаты расчета накопительной емкости активного фильтра высших гармоник для уровней напряжения распределительных сетей высокопроизводительных угольных шахт, мкФ

S, кВА	380 В	660 В	1140 В	3300 В	6600 В
50	278,65	92,37	30,96	3,69	0,92
100	557,31	184,75	61,92	7,39	1,85
150	835,96	277,12	92,88	11,08	2,77
200	1114,62	369,49	123,85	14,78	3,69
250	1393,27	461,87	154,81	18,47	4,62
300	1671,93	554,24	185,77	22,17	5,54
350	1950,58	646,61	216,73	25,86	6,47
400	2229,24	738,99	247,69	29,56	7,39
450	2507,89	831,36	278,65	33,25	8,31
500	2786,55	923,73	309,62	36,95	9,24

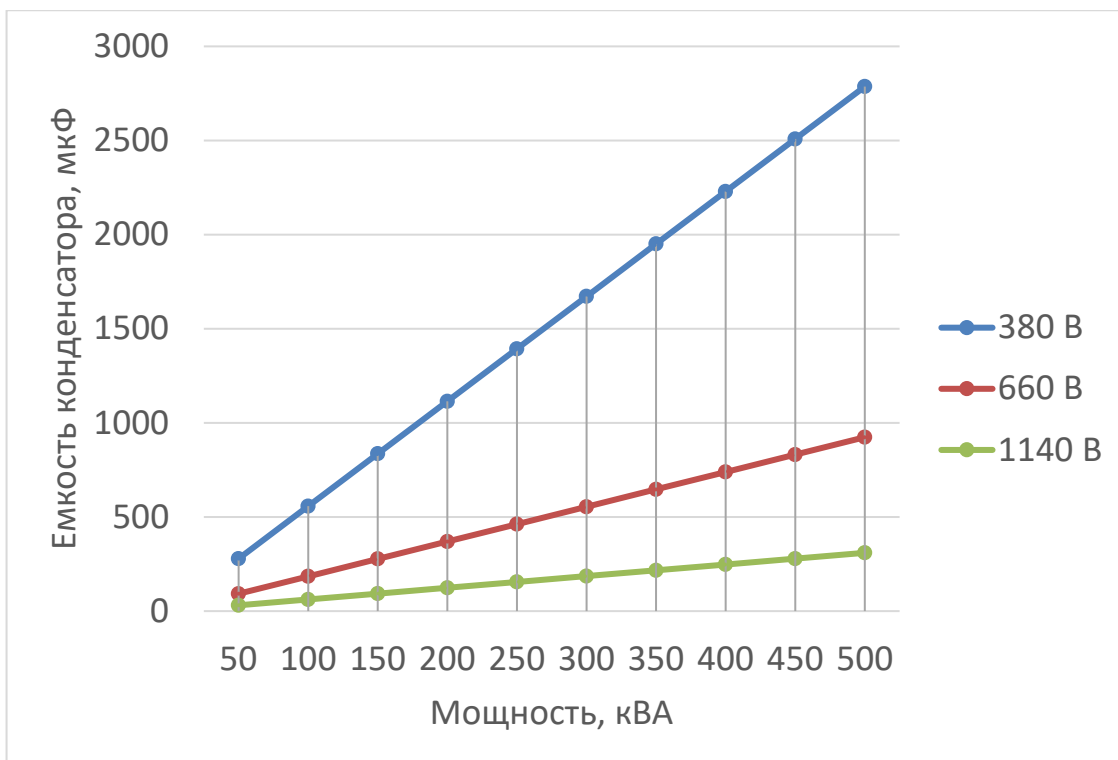


Рисунок 3.12 - Параметры накопительной емкости активного фильтра
(Уровень напряжения 380 В, 660 В, 1140 В)

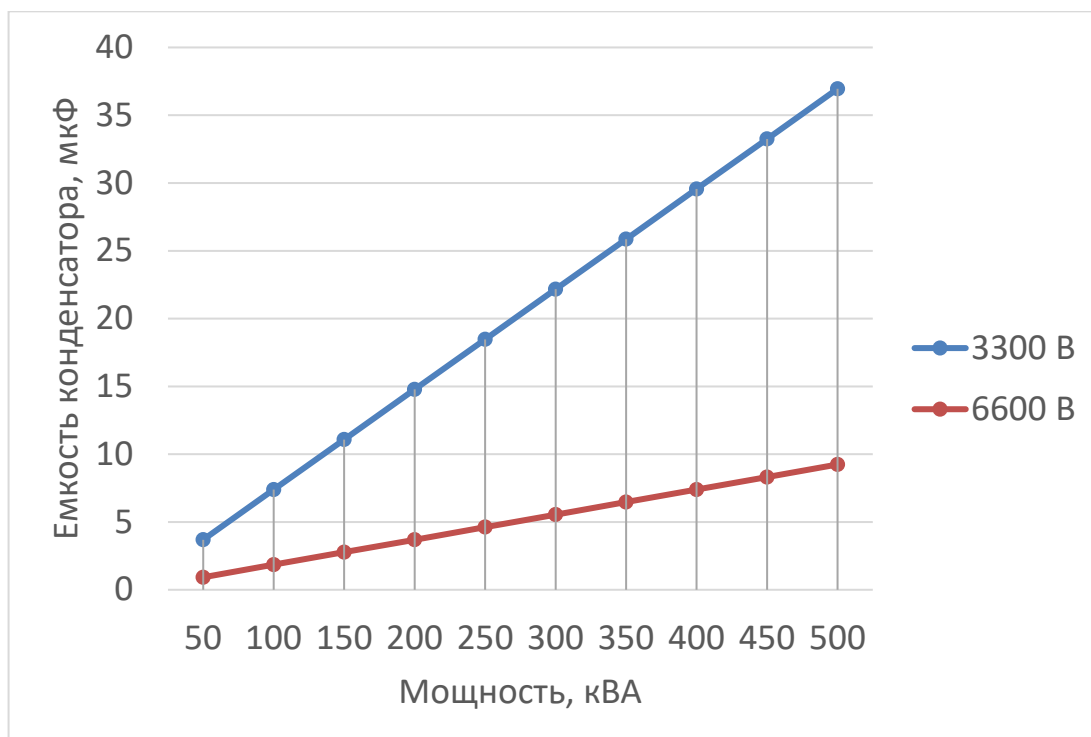


Рисунок 3.13 - Параметры накопительной емкости активного фильтра
(Уровень напряжения 3300 В, 6600 В)

Расчет индуктивности входного дросселя активного фильтра высших гармоник осуществляется следующим образом:

$$\Delta U = 2\pi fLI \text{ или } L = \frac{\Delta U}{2\pi fI},$$

где: ΔU – потери напряжения на дросселе, В; f – частота питающей сети, Гц; I – ток, А; L – индуктивность, Гн.

Величину индуктивности входного дросселя активного фильтра высших гармоник рассчитываем, используя соотношение полной мощности для трехфазной симметричной электрической цепи $S = \sqrt{3}UI$, и ранее представленную формулу определяем значение индуктивности:

$$L = \frac{\sqrt{3}U \cdot \Delta U}{2\pi fS} \quad (3.16)$$

Результаты расчета входного дросселя активного фильтра высших гармоник, для уровней напряжения распределительных сетей высокопроизводительных угольных шахт в табл. 3.3 и рис. 3.14 – 3.16.

Таблица 3.3 - Результаты расчета входного дросселя активного фильтра высших гармоник, для уровней напряжения распределительных сетей высокопроизводительных угольных шахт, Гн

S, кВА	380 В	660 В	1140 В	3300 В	6600 В
50	0,00016	0,00048	0,00143	0,01201	0,04803
100	0,00008	0,00024	0,00072	0,006	0,02402
150	0,00005	0,00016	0,00048	0,004	0,01601
200	0,00004	0,00012	0,00036	0,003	0,01201
250	0,00003	0,0001	0,00029	0,0024	0,00961
300	0,00003	0,00008	0,00024	0,002	0,00801
350	0,00002	0,00007	0,0002	0,00172	0,00686
400	0,00002	0,00006	0,00018	0,0015	0,006
450	0,00002	0,00005	0,00016	0,00133	0,00534
500	0,00002	0,00005	0,00014	0,0012	0,0048

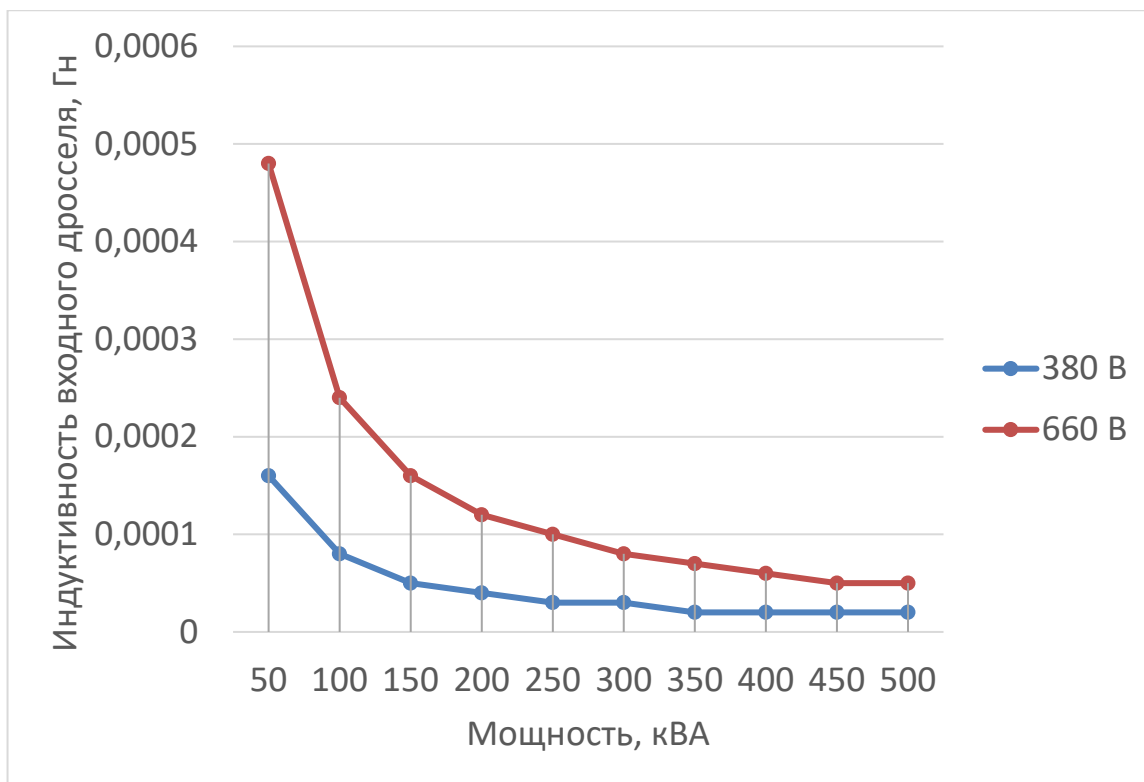


Рисунок 3.14 - Параметры входного дросселя активного фильтра
(Уровень напряжения 380 и 660 В)

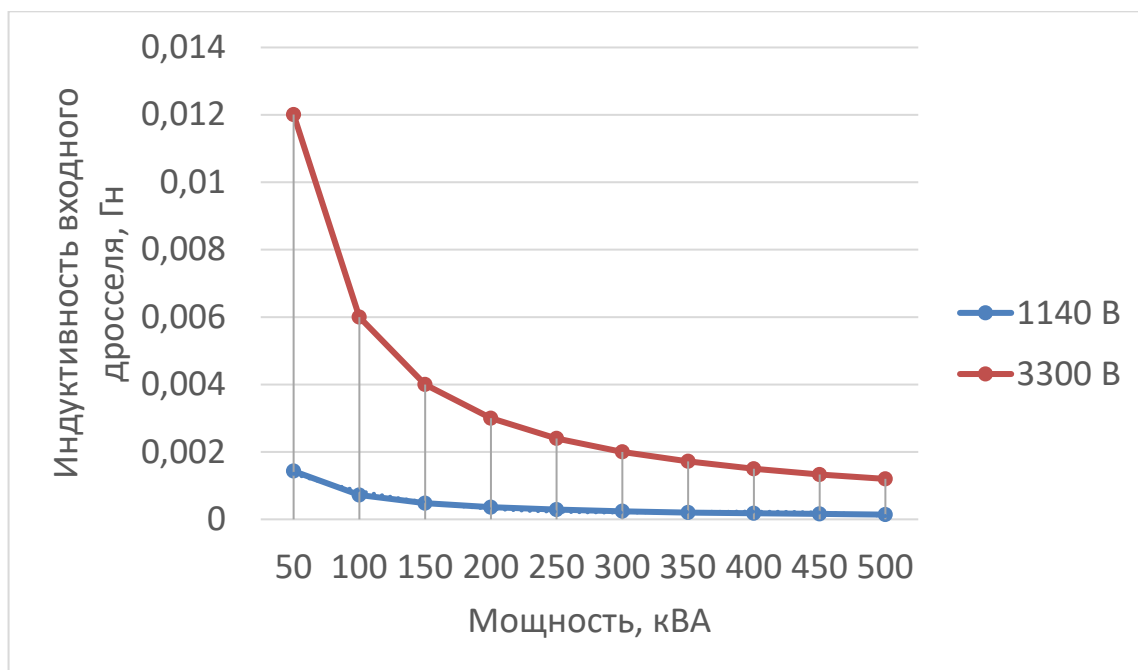


Рисунок 3.15 - Параметры входного дросселя активного фильтра
(Уровень напряжения 1140 и 3300 В)

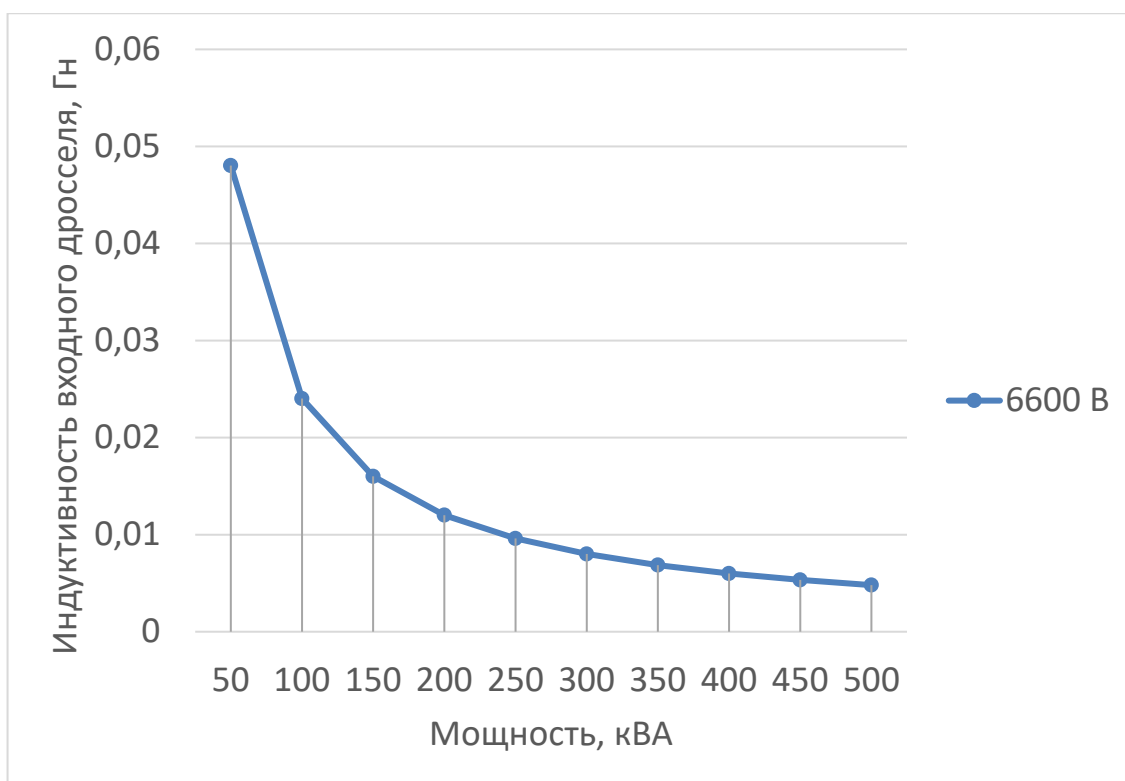


Рисунок 3.16 - Параметры входного дросселя активного фильтра
(Уровень напряжения 6600 В)

Результаты определения выражений по определению параметров активного фильтра высших гармоник представлены в табл. 3.4.

Таблица 3.4 - Результаты определения выражений по определению параметров активного фильтра высших гармоник

Уровень напряжения, В	Выражение для определения емкости	Выражение для определения индуктивности
380	$C=3,72*S+371,52$	$L= 0,006*S^{-1}$
660	$C=1,848*S-0,12$	$L= 0,024*S^{-1}$
1140	$C=0,62*S+0,01$	$L= 0,074*S^{-1}$
3300	$C=0,094*S-6,99$	$L= 0,601*S^{-1}$
6600	$C=0,019*S-0,017$	$L= 2,403*S^{-1}$

Следует отметить, что представленные зависимости (рис. 3.12, - рис. 3.16) по определению ряда параметров активного фильтра высших гармоник позволят провести его настройку на конкретный уровень напряжения, который используется в подземных электрических сетях высокопроизводительных угольных шахт, в том числе опасных по внезапным выбросам газа и пыли.

3.3 Выводы

Исследования, проведенные в данной главе, позволяют сделать следующие выводы:

1. Разработан алгоритм выбора фильтров высших гармоник для высокопроизводительных угольных шахт, в том числе опасных по внезапным выбросам газа и пыли;

2. Проведен анализ существующих схемных решений активных фильтров высших гармоник и обосновано применение активного фильтра с параллельным подключением и емкостным накопителем энергии.

3. Впервые для условий подземных электрических сетей угольных шахт получены зависимости, позволяющие определить накопительную емкость активного фильтра высших гармоник $C = f(U)$ и индуктивность входного дросселя активного фильтра $L = f(U)$ для всех уровней напряжений, используемых в условиях высокопроизводительных угольных шахт.

Глава 4. Исследование качества электрической энергии в подземных сетях угольных шахт с применением активных фильтров высших гармоник

4.1 Методика моделирования системы электроснабжения высокопроизводительных участков угольных шахт

Решение поставленной задачи по определению ожидаемых показателей качества электроэнергии в системе подземного электроснабжения высокопроизводительных участков угольных шахт требует проведения ряда исследований по моделированию показателей качества электрической энергии.

Основные технические параметры технологического оборудования выемочного участка шахты «Полысаевская» АО «СУЭК-Кузбасс», кабельных линий и трансформаторных подстанций в условиях этого же участка представлены в табл. 4.1, табл. 4.2, табл. 4.3.

На рис. 4.1 представлена технологическая схема выемочного участка угольной шахты (ш. Полысаевская СУЭК-Кузбасс), на которой отображено технологическое оборудование, а также понизительные подстанции энергопоезда и кабельные линии для питания потребителей выемочного участка. На рис. 4.2 представлена схема электроснабжения выемочного участка, с основными параметрами понизительных подстанций энергопоезда и уровнями питающего напряжения основного технологического оборудования.

На рис. 4.3, рис. 4.4, рис. 4.5 представлены схемы питания электроприводов основного технологического оборудования участка с наличием в системах электроприводов преобразовательных устройств. Следует отметить, что данные схемы положены в основу разработки подсистем имитационной модели.

Таблица 4.1 - Технические параметры технологического оборудования
выемочного участка

Тип рабочей машины	Тип электро двигател я на рабочей машине	Технические данные электродвигателей							
		P _{ном} кВт	I _{ном} А	I _{пуск} А	$\frac{M_n}{M_n}$	$\frac{M_{\kappa}}{M_n}$	cos ϕ	кпд	U _{ном} В
Потребители ТЕК-1324 S=1500 кВА									
Комбайн SL-300	DEW64 ESM420								
	A5W200M42	480	100	710	1,8	2,1	0,88	93,5	3300
	dWaE20/2-4	80	55	385	2,2	2,4	0,87	92	440
		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
$\sum P_n = 1138 \text{ кВт}$									
Потребители ТЕК-1534 S=2500 кВА									
Забойный конвейер Привод AFC	3SG3F 450L-4A	500	310	725	1,5	1,7	0,88	93,0	1140
Забойный конвейер Привод AFC	3SG3F 450L-4A	500	310	725	1,5	1,7	0,88	93,0	1140
Забойный конвейер Привод AFC	3SG3F 450L-4A	500	310	725	1,5	1,7	0,88	93,0	1140
Перегружатель FSL-9	3SG3F 450L-4A	500	310	725	1,5	1,7	0,88	93,0	1140
$\sum P_n = 2000 \text{ кВт}$									
Потребители ТЕК-1324 S=1250 кВА									
Дробилка FBL-10G	2SGP 315M-4	200	144	576	2,1	2,3	0,92	94,0	1140
$\sum P_n = 200 \text{ кВт}$									

Таблица 4.2 - Технические параметры кабельных линий, используемых для питания технологического оборудования выемочного участка

Уровень напряжения	6 кВ
Потребитель	Вводной кабель
Тип кабеля	КВЭМББШВ6-3х120
Активное	0,153 Ом/км
Индуктивное	0,166 Гн/км
Емкостное	0,31 мкФ/км
Уровень напряжения	3,3 кВ
Потребитель	Комбайн
Тип кабеля	PROTOMONT 3х70+3х(1,5STKON+35/3KON) +ÜLKON
Активное	0,277 Ом/км
Индуктивное	0,3 Гн/км
Емкостное	0,34 мкФ/км
Уровень напряжения	1,14 кВ
Потребитель	Лавный конвейер, перегружатель
Тип кабеля	PROTOMONT 3х95+3х50/3E + 3х2,5S
Активное	0,21 Ом/км
Индуктивное	0,29 Гн/км
Емкостное	0,31 мкФ/км
Уровень напряжения	1,14 кВ
Потребитель	Дробилка
Тип кабеля	PROTOMONT (КГЭШ) 3*50
Активное	0,393 Ом/км
Индуктивное	0,32 Гн/км
Емкостное	0,3 мкФ/км

Таблица 4.3 - Технические параметры понизительных подстанций выемочного участка

Тип, мощность, напряжение	I _{ном} в/в и н/в обмоток, А	U _{кз} , %	P _{кз} , кВт	P _{хх} , кВт	Сопротивление, Ом		
					X _T	R _T	Z _T
ТЕК 1324 1500/3,3	137,5/251	4,2	8,424	3,477	0,305	0,0408	0,3079
ТЕК1534 2500/1,14	229,1/1202	3,7	8,298	4,426	0,0214	0,0020	0,0224
ТЕК1324 1250/1,14	114,6/601	3,5	3,882	2,878	0,0404	0,0036	0,0424

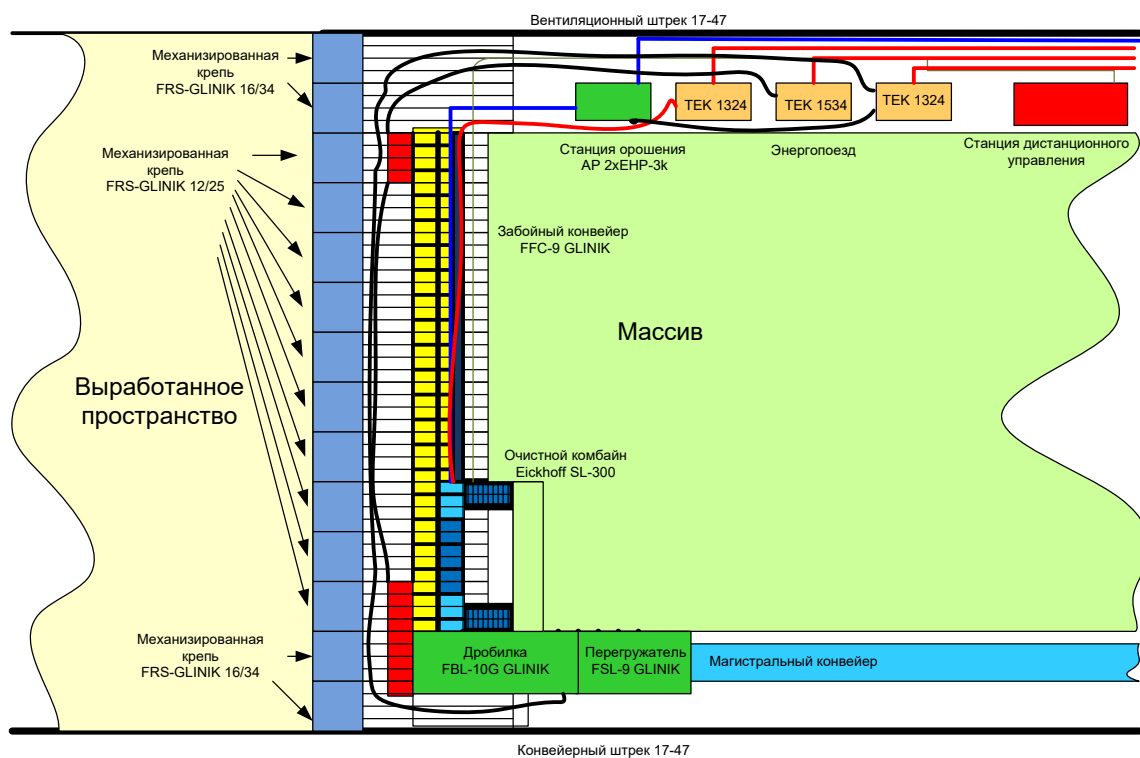


Рисунок 4.1 - Технологическая схема выемочного участка

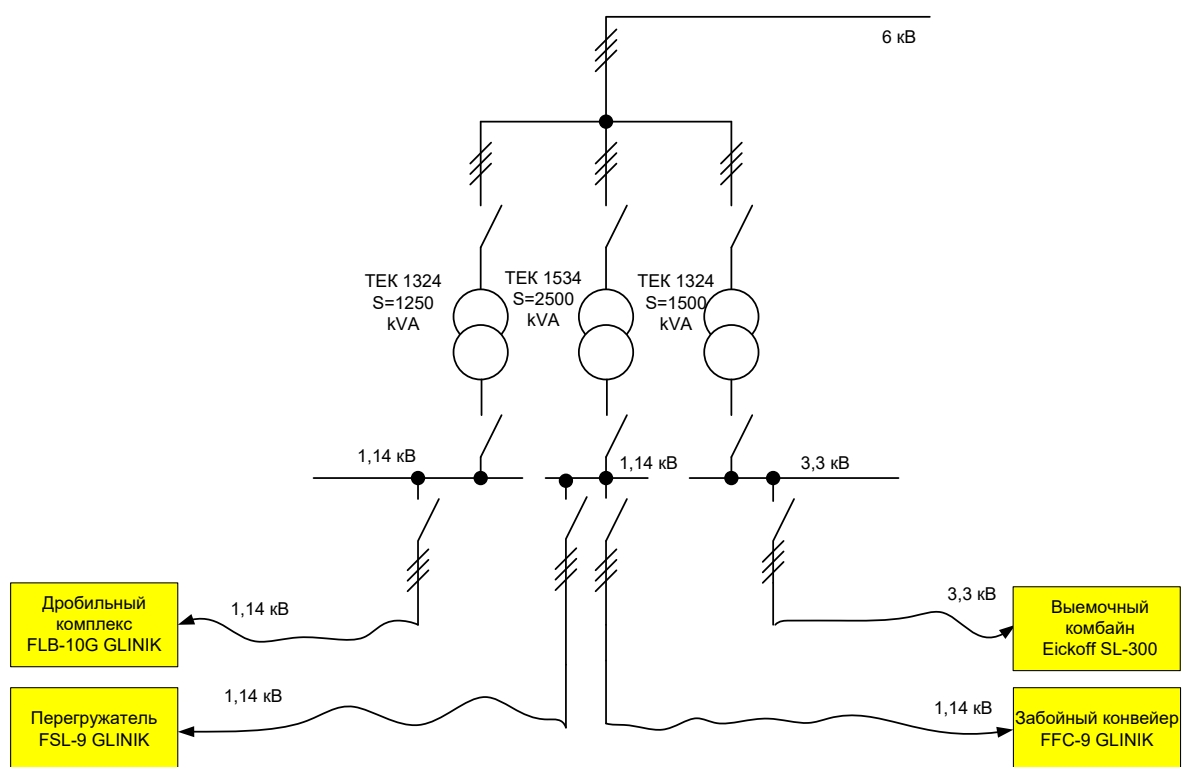


Рисунок 4.2 – Схема электроснабжения выемочного участка

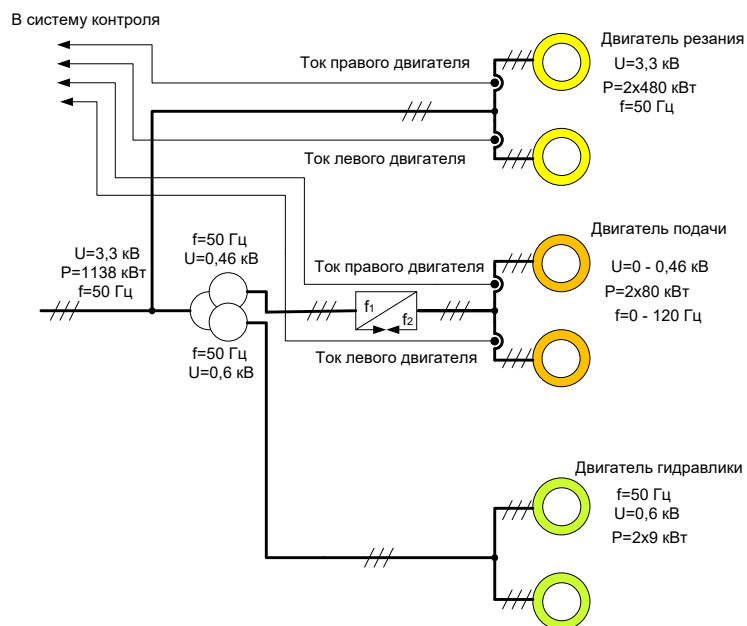


Рисунок 4.3 - Схема питания электроприводов выемочного комбайна

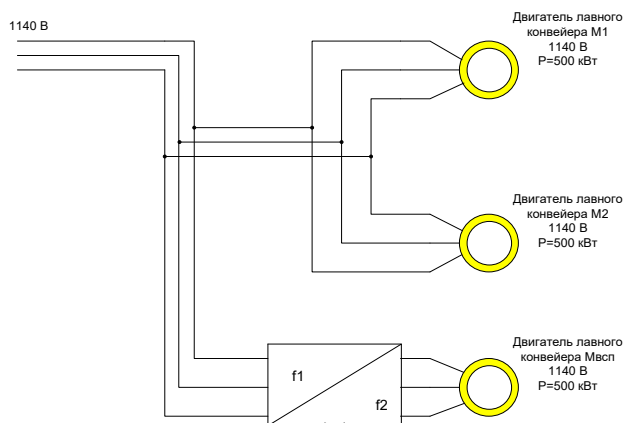


Рисунок 4.4 - Схема питания электроприводов забойного конвейера

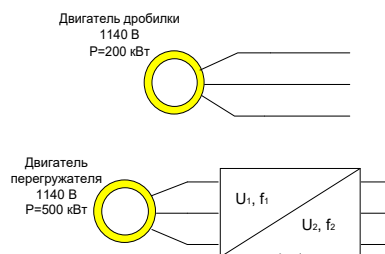


Рисунок 4.5 - Схема питания электроприводов дробилки и перегружателя

Имитационная модель системы электроснабжения высокопроизводительного участка угольной шахты выполнена со следующими допущениями:

- Нелинейная нагрузка в системе электроснабжения представлена в виде трехфазного неуправляемого шестипульсного выпрямителя;
- Линейная нагрузка в системе электроснабжения принята в виде активно-индуктивной составляющей;
- Источник напряжения, питающий высокопроизводительный выемочный участок угольной шахт, представлен в виде источника с внутренним сопротивлением (активным и индуктивным);
- Внутренним сопротивлением коммутационных аппаратов пренебрегаем.

4.2 Моделирование системы электроснабжения выемочного участка с учетом гармонического состава сети

Имитационная модель системы электроснабжения выемочного участка угольной шахты (рис. 4.6) выполнена в соответствии со схемой электроснабжения выемочного участка, представленной на рис. 4.2. Модель состоит из следующих элементов: трехфазный программируемый источник переменного напряжения, с помощью которого задается напряжение, поступающее на выемочный участок (3-Phase Source). В системе имеется трехфазный универсальный измеритель (Three-Phase V-I Measurement), который позволит оценить формы сигнала на источнике напряжения и тока при отсутствии системы компенсации высших гармонических составляющих и при включении ее. В качестве выходного устройства трехфазного универсального измерителя является осциллограф Scope. Анализатор суммарного коэффициента гармонических составляющих по напряжению (THD(U)). Система Powergui, служащая для дополнительного анализа имитационной модели, в том числе по гармоническому составу системы. Подсистема (LOAD), имитирующая систему электроснабжения выемочного участка угольной шахты и основное технологическое оборудование.

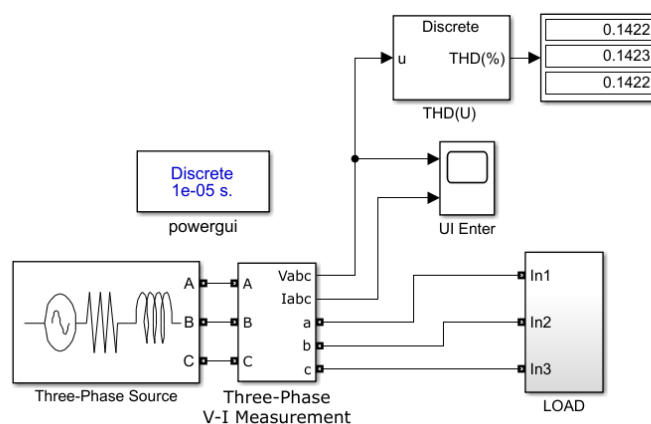


Рисунок 4.6 – Имитационная модель системы электроснабжения выемочного участка угольной шахты с основным технологическим оборудованием

В свою очередь подсистема LOAD (Нагрузка) содержит следующие элементы (рис. 4.7): Three-Phase V-I Measurement (трехфазный универсальный измеритель тока и напряжения) – данный элемент служит для измерения трёхфазных значений тока (выход из подсистемы 1) и напряжения (Score) на входе энергопоезда высокопроизводительного выемочного участка; анализатор суммарного коэффициента гармонических составляющих по напряжению (THD(U)) на входе выемочного участка; три понизительные подстанции энергопоезда, которые имитирует преобразование первичного напряжения 6 кВ во вторичные уровни напряжения (1,14 кВ и 3,3 кВ), служащее для питания потребителей выемочного участка; подсистемы FSL-9 Glinik, FFC-9 Glinik, Eickoff SL-300, FBL-10G Glinik - имитирующие электромеханические системы основного технологического оборудования выемочного участка; ряд измерительных устройств по току, напряжению, суммарному гармоническому составу по напряжению (THD(U)), как по конкретному оборудованию выемочного участка, так и на выходе понизительных подстанций, ввиду того, что они питают несколько потребителей выемочного участка.

На рис. 4.8 представлена подсистема имитационной модели выемочного комбайна SL-300.

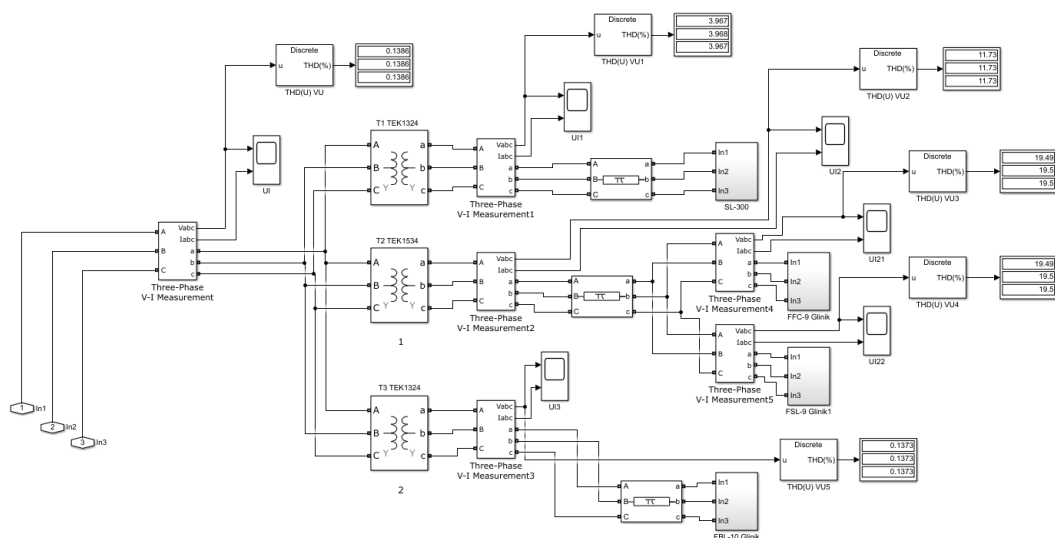


Рисунок 4.7 – Подсистема имитационной модели LOAD (Нагрузка)

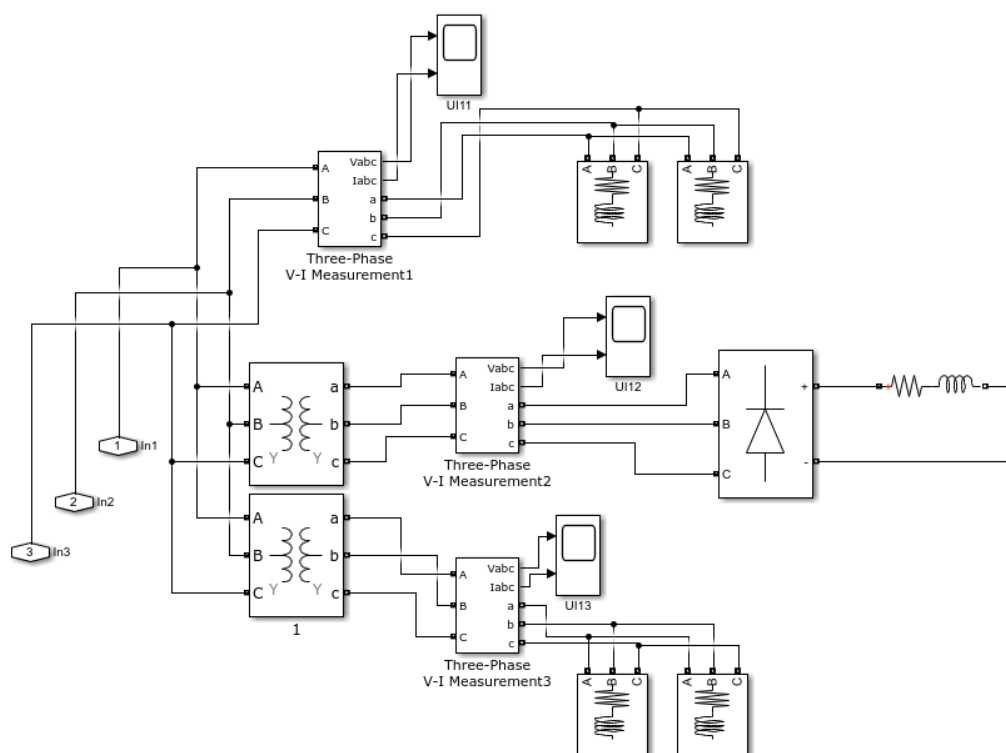


Рисунок 4.8 – Подсистема имитационной модели
Выемочный комбайн (SL-300)

Имитационная модель представлена в виде: две активно-индуктивные нагрузки, имитирующих высоковольтные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором, которые получают питание от подстанции энергопоезда без каких-либо преобразовательных устройств (органы резания выемочного комбайна); две активно-индуктивные нагрузки имитирующие низковольтные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором, получают питание от понижающего трансформатора, входящего в состав выемочного комбайна без каких-либо преобразовательных устройств (гидравлическая система выемочного комбайна); неуправляемого выпрямителя, имитирующего первое звено двухзвенного преобразователя частоты, получающего питание от понижающего трансформатора входящего в состав выемочного комбайна и активно-индуктивной нагрузки органа подачи выемочного комбайна. Также имеется ряд измерительных устройств по току и напряжению.

Подсистема имитационной модели Забойный конвейер FFC-9 Glinik представлена на рис. 4.9. Имитационная модель представлена следующими элементами: две активно-индуктивные нагрузки имитирующие асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором, которые получают питание от подстанции энергопоезда без каких-либо преобразовательных устройств (передние электродвигатели забойного конвейера); неуправляемым выпрямителем, имитирующие первое звено двухзвенного преобразователя частоты, получающего питание от подстанции энергопоезда и активно-индуктивной нагрузкой, имитирующей задний электродвигатель забойного конвейера. Также имеется ряд измерительных устройств по току и напряжению.

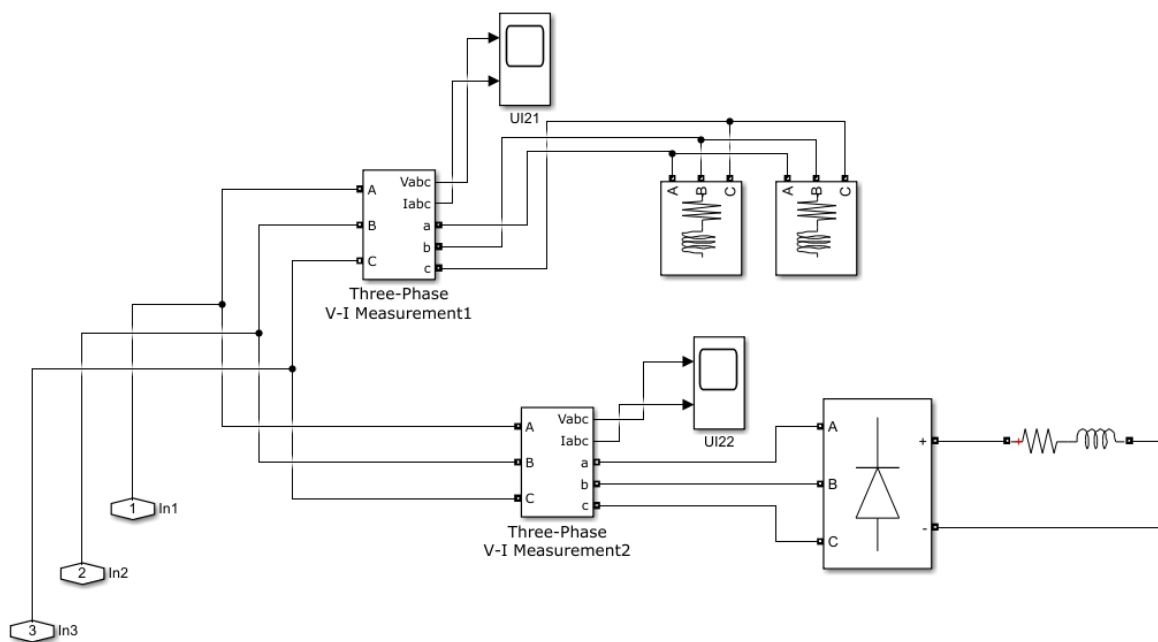


Рисунок 4.9 – Подсистема имитационной модели
Забойный конвейер (FFC-9 Glinik)

На рис. 4.10 представлена подсистема имитирующая работу электромеханической системы перегружателя FSL-9 Glinik.

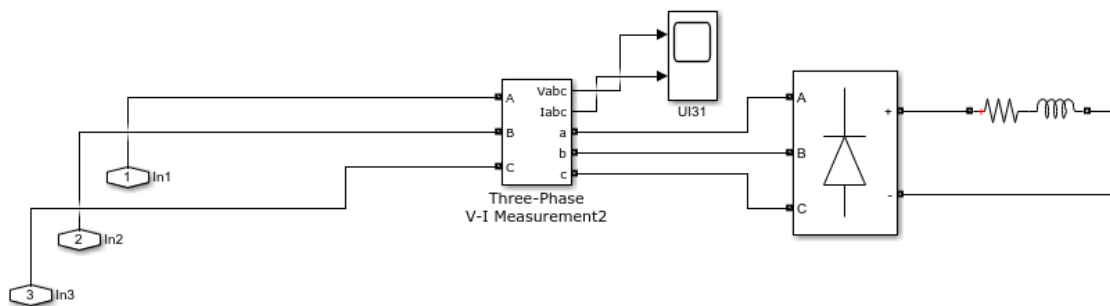


Рисунок 4.10 – Подсистема имитационной модели
Перегрузатель (FSL-9 Glinik)

Имитационная модель представлена: неуправляемым выпрямителем имитирующим первое звено двухзвенного преобразователя частоты, получающего питание от подстанции энергопоезда и активно-индуктивной нагрузкой, имитирующей электродвигатель перегружателя, измерительное устройство по току, напряжению.

На рис. 4.11 представлена подсистема, имитирующая работу электромеханической системы дробилки FBL-10G Glinik. Она представлена активно-индуктивной нагрузкой, получающей питание без каких-либо преобразовательных устройств от понизительной подстанции энергопоезда, а также вспомогательным блоком (имитирующим нагрузку на систему электропривода) и измерительным блоком по току и напряжению.

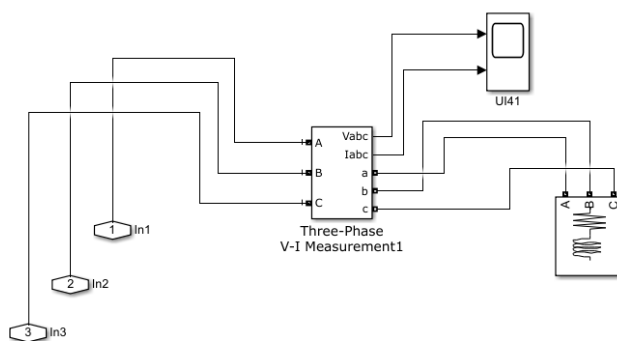


Рисунок 4.11 – Подсистема имитационной модели
Дробилка (FBL-10G Glinik)

4.3 Моделирование системы электроснабжения выемочных участков с устройством повышения качества электрической энергии

Имитационная модель системы электроснабжения выемочного участка угольной шахты с устройством повышения качества электрической энергии (рис. 4.6) выполнена в соответствии со схемой электроснабжения выемочного участка, представленной на рис. 4.12. Модель состоит из следующих элементов: трехфазный программируемый источник переменного напряжения, с помощью которого задается напряжение, поступающее на выемочный участок (3-Phase Source); трехфазный универсальный измеритель (Three-Phase V-I Measurement), который позволяет оценить формы сигнала на источнике напряжения и тока при отсутствии системы компенсации высших гармонических составляющих и при включении ее; осциллограф Scope; анализатор суммарного коэффициента гармонических составляющих по напряжению (THD(U)); система Powergui, служащая для дополнительного анализа, в том числе по гармоническому составу системы имитационной модели.

Кроме того, в имитационной модели присутствует ряд элементов устройства повышения качества электрической энергии (активного фильтра высших гармоник): Three-Phase Series AFVG – вводной дроссель активного фильтра высших гармоник; Universal Bridge AFVG – трехфазный высоковольтный активный выпрямитель выполнен на 6 IGBT (биполярный транзистор с изолированным затвором), соединённых по классической мостовой схеме; C AFVG – емкостной накопитель активного фильтра высших гармоник. В состав имитационной модели входит ряд подсистем: LOAD (Нагрузка) (рис. 4.13) – имитирующая систему электроснабжения выемочного участка (энергопоезд) и его основное технологическое оборудование; CLARKE (Система управления активным фильтром высших гармоник) – система, формирующая сигналы управления выпрямителем активного фильтра высших гармоник.

математические действия с сигналами по уровню напряжения с целью формирования сигналов управления активным выпрямителем, входящим в состав активного фильтра высших гармоник. Алгоритм формирования сигналов управления активным фильтром высших гармоник представлен в главе 2. Следует отметить, что необходимые блоки для формирования преобразований Кларка, а также ряда вычислений в программном продукте Matlab отсутствуют, поэтому были разработаны подсистемы (блоки), в состав которых входит ряд уравнений, формирующие эти вычисления. В частности, на рис. 4.15 представлен блок прямого преобразования Кларка по напряжению (CLARKE V). На рис. 4.16 представлен блок прямого преобразования Кларка по току (CLARKE I). На рис. 4.17 представлен блок вычисления исходных параметров активной и реактивной мощности (PQ calculation), а на рис. 4.18 - блок вычисления необходимых параметров активной и реактивной мощности (Calculation I_{α}^* & I_{β}^*). На рис. 4.19 представлен блок обратного преобразования Кларка по току (Inverse CLARKE transformation I^*). В системе управления присутствует PI – регулятор в качестве элемента обратной связи по напряжению на накопительном конденсаторе активного фильтра высших гармоник.

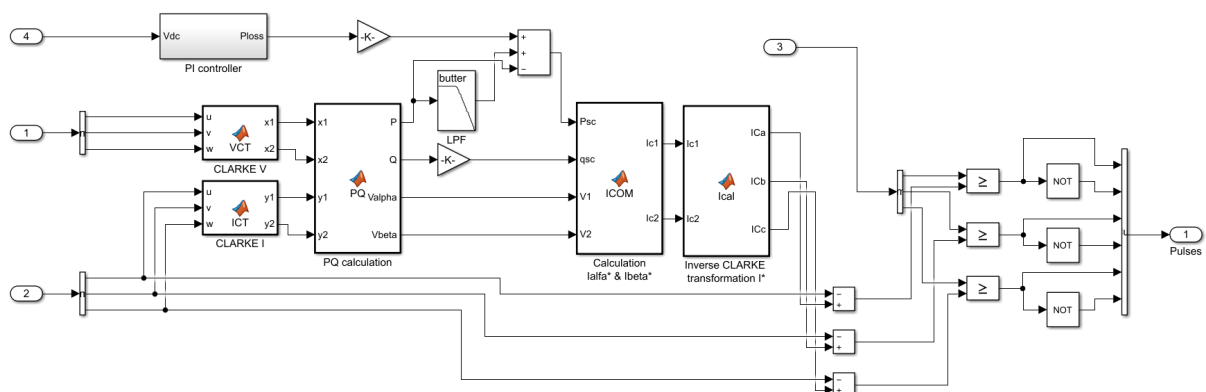


Рисунок 4.14 – Подсистема имитационной модели CLARKE
(Система управления активным фильтром высших гармоник)

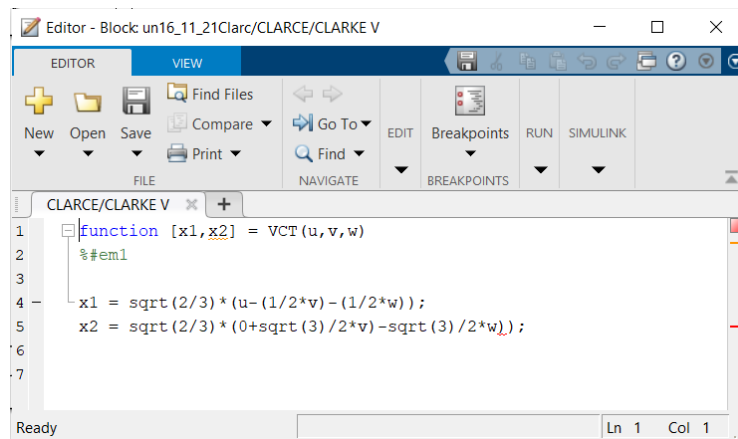


Рисунок 4.15 – Блок прямого преобразования Кларка по напряжению (CLARKE V)

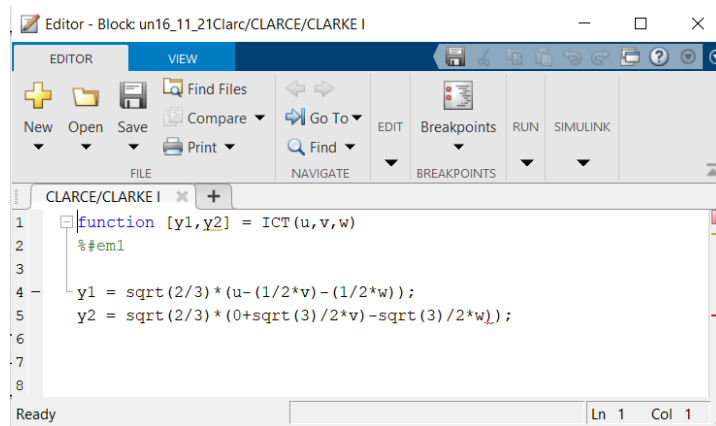


Рисунок 4.16 – Блок прямого преобразования Кларка по току (CLARKE I)

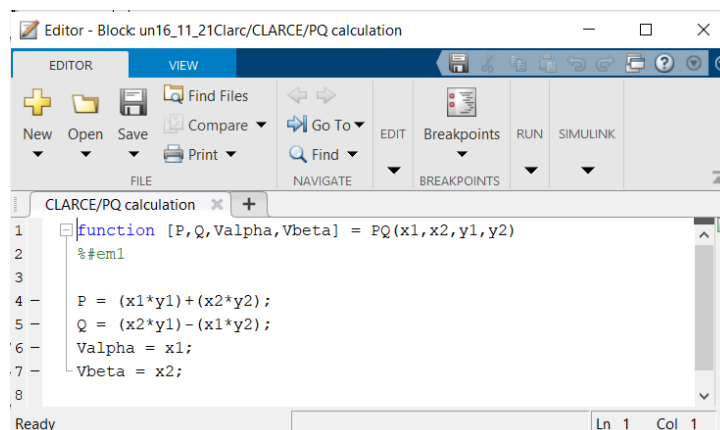


Рисунок 4.17 – Блок вычисления исходных параметров активной и реактивной мощности (PQ calculation)

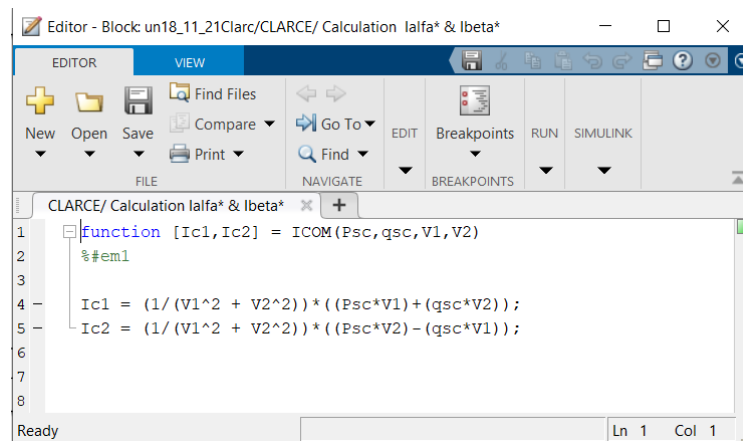


Рисунок 4.18 – Блок вычисления желаемых параметров активной и реактивной мощности (Calculation Ialfa*&Ibeta*)

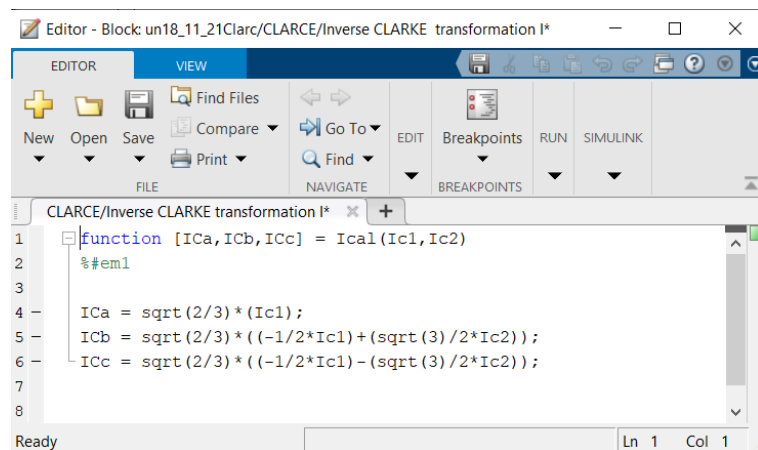


Рисунок 4.19 – Блок обратного преобразования Кларка по току (Inverse CLARKE transformation I*)

4.4 Анализ результатов моделирования системы электроснабжения выемочных участков с учетом гармонического состава сети

Результаты моделирования системы электроснабжения выемочных участков с учетом гармонического состава сети представлен в виде осциллограмм и спектральных гармонических составляющих, снятых на модели системы электроснабжения высокопроизводительного выемочного участка в ряде контрольных точек. В частности, на рис. 4.19 представлены осциллограммы напряжения и тока на входе выемочного участка угольной шахты. Анализ осциллограмм показал, что амплитудные значения напряжения лежит в пределах от -9319 В до $+9319$ В, а амплитудные значения тока - в пределах от -518 А до $+518$ А. На рис. 4.20 представлены формы сигнала по напряжению и току, а также гармонический состав по напряжению и току на входе выемочного участка угольной шахты. Анализ гармонического состава по напряжению показал, что суммарный коэффициент гармонических составляющих высших гармоник (СКГЧН) или Total Harmonic Distortion Voltage (THD(U)) составляет 0,05 %, что соответствует ГОСТ 32144 – 2013, который регламентирует значение суммарных коэффициентов гармонических составляющих не более 5% для напряжения 6 кВ.

Анализ гармонического состава по току показал, что суммарный коэффициент гармонических составляющих высших гармоник (СКГСТ) или Total Harmonic Distortion Current (THD(I)) составляет 3,34 %. Данный параметр не регламентируемым ГОСТ. На рис. 4.21 представлены осциллограммы напряжения и тока на выходе понизительной подстанции энергопоезда, питающей выемочный комбайн. Анализ осциллограмм показал, что амплитудные значения напряжения лежит в пределах от -4899 В до $+4899$ В, амплитудные значения тока - в пределах от $-327,4$ А до $+327,4$ А.

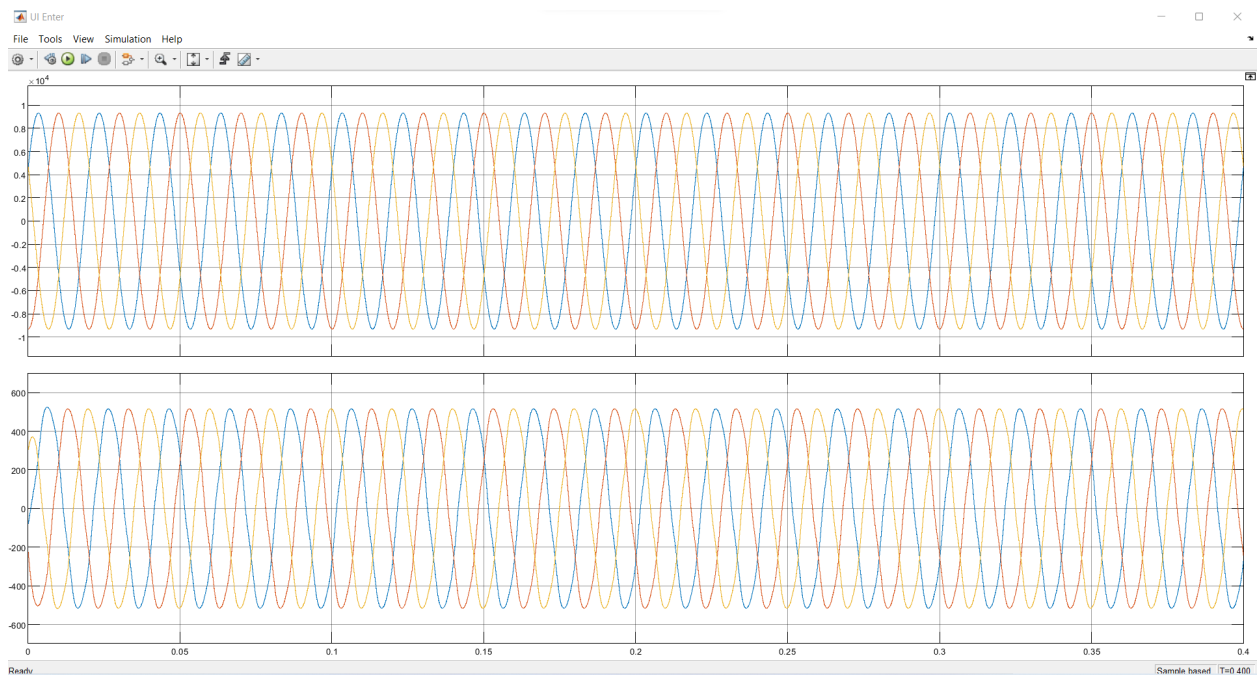


Рисунок 4.19 – Осциллограммы напряжения и тока на входе выемочного участка угольной шахты

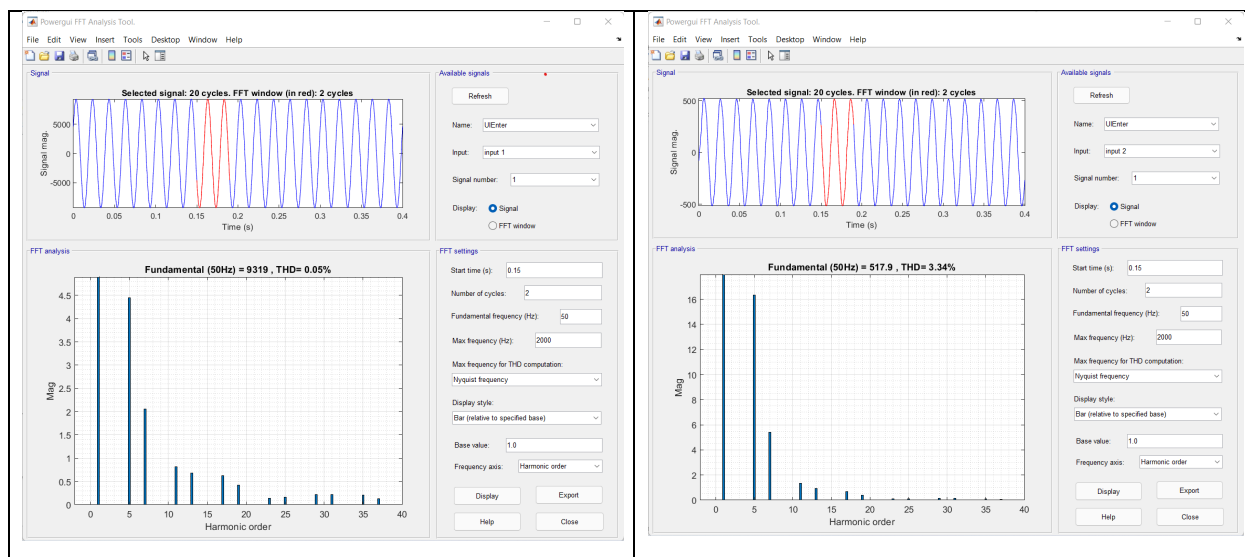


Рисунок 4.20 – Формы сигнала по напряжению и току, а также гармонический состав по напряжению и току на входе выемочного участка угольной шахты

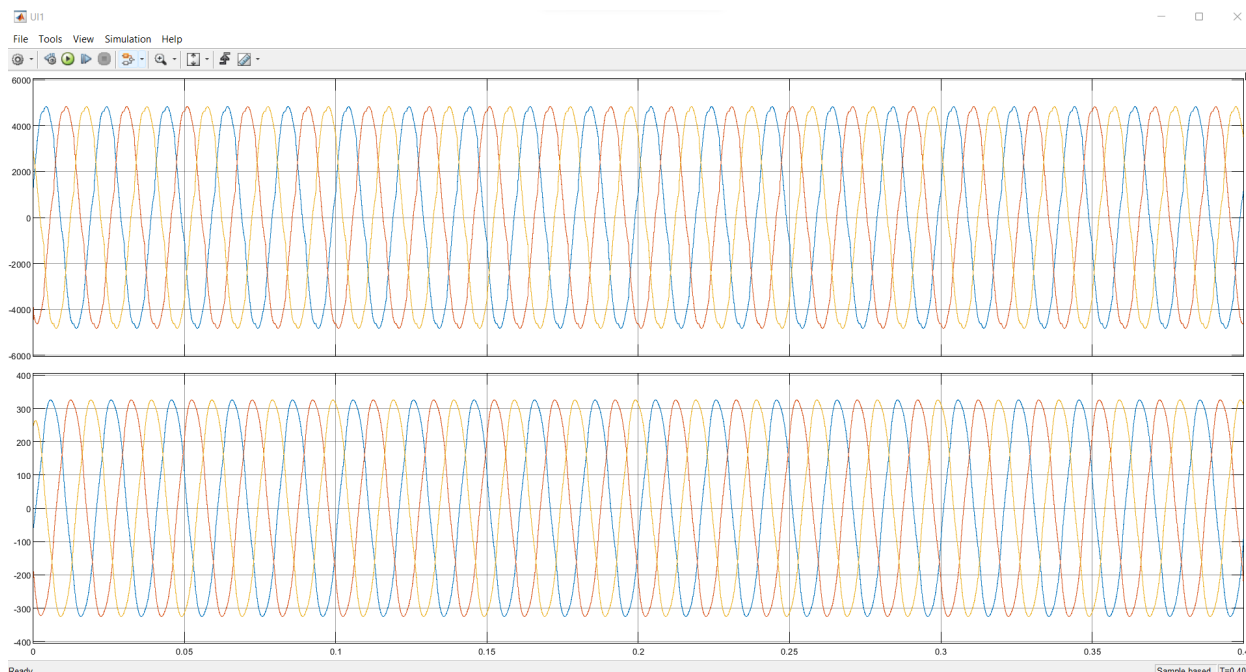


Рисунок 4.21 - Осциллограммы напряжения и тока на выходе понизительной подстанции энергопоезда, питающей выемочный комбайн

На рис. 4.22 представлены формы сигнала по напряжению и току, а также гармонический состав по напряжению и току на выходе понизительной подстанции энергопоезда, питающей выемочный комбайн.

Анализ гармонического состава по напряжению показал, что суммарный коэффициент гармонических составляющих высших гармоник (СКГСН) или Total Harmonic Distortion Voltage (THD(U)) составляет 3,97 %, что соответствует ГОСТ 32144 – 2013, который регламентирует значение суммарных коэффициентов гармонических составляющих, в пределах 5% для напряжения 6 кВ. Анализ гармонического состава по току показал, что суммарный коэффициент гармонических составляющих высших гармоник (СКГСТ) или Total Harmonic Distortion Current (THD(I)) составляет 3,47 %. Данный параметр не регламентируется ГОСТ.

На рис. 4.23 представлены осциллограммы напряжения и тока на выходе понизительной подстанции энергопоезда, питающей забойный конвейер и перегружатель.

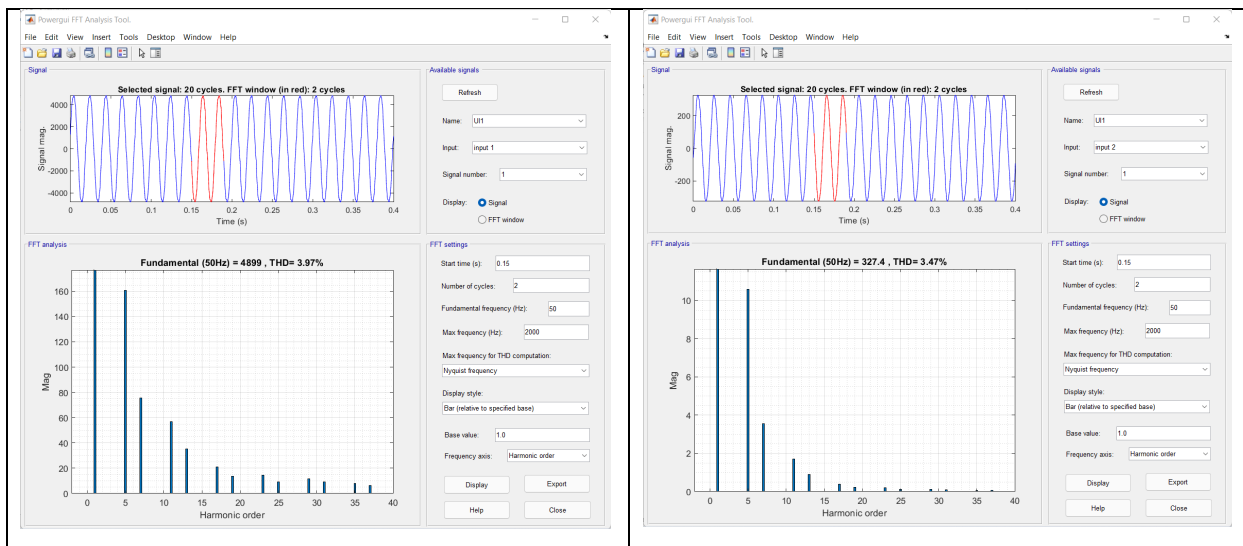


Рисунок 4.22 - Формы сигнала по напряжению и току, а также гармонический состав по напряжению и току на выходе понизительной подстанции энергопоезда, питающей выемочный комбайн

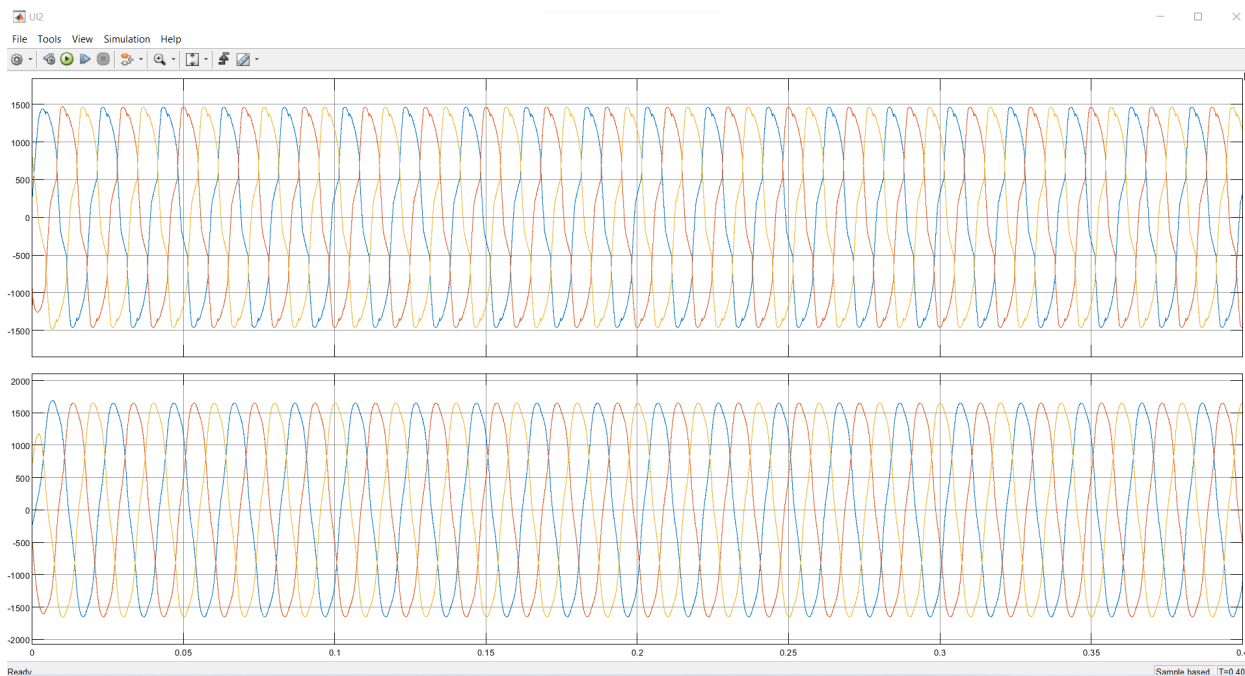


Рисунок 4.23 - Осциллограммы напряжения и тока на выходе понизительной подстанции энергопоезда, питающей забойный конвейер и перегружатель

Анализ осциллограмм показал, что амплитудные значения напряжения лежит в пределах от -1466 В до $+1466$ В, амплитудные значения тока лежит в пределах от -1667 А до $+1667$ А. На рис. 4.24 представлены формы сигнала по напряжению и току, а также гармонический состав по напряжению и току на выходе понизительной подстанции энергопоезда, питающей забойный конвейер и перегружатель. Анализ по напряжению показал, что суммарный коэффициент гармонических составляющих высших гармоник (СКГСН) или Total Harmonic Distortion Voltage (THD(U)) составляет 11,72 %, что не соответствует ГОСТ 32144 – 2013, а по току показал, суммарный коэффициент гармонических составляющих высших гармоник (СКГСТ) или Total Harmonic Distortion Current (THD(I)) составляет 5,27 %, который не регламентируется ГОСТ.

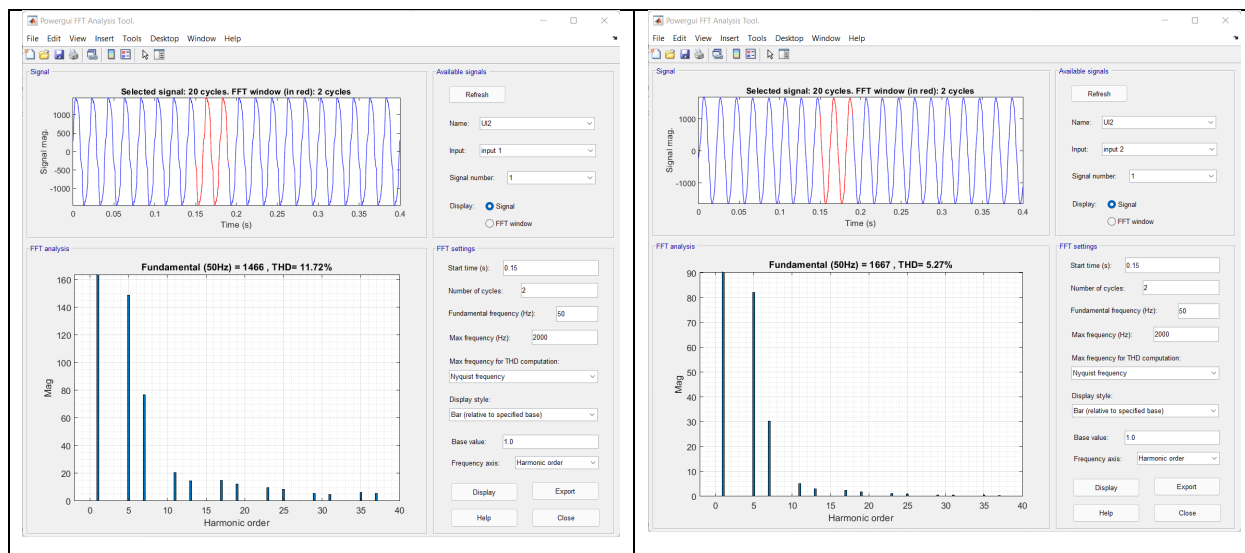


Рисунок 4.24 - Формы сигнала по напряжению и току, а также гармонический состав по напряжению и току на выходе понизительной подстанции энергопоезда, питающей забойный конвейер и перегружатель

На рис. 4.25 представлены осциллограммы напряжения и тока на выходе понизительной подстанции энергопоезда, питающей дробилку. Анализ осциллограмм показал, что амплитудные значения напряжения лежит в пределах от -1764 В до $+1764$ В, амплитудные значения тока лежит в пределах от $-156,7$ А до $+156,7$ А. На рис. 4.26 представлены Формы сигнала по напряжению и току, а также гармонический состав по напряжению и току на выходе понизительной подстанции энергопоезда, питающей дробилку. Анализ гармонического состава по напряжению показал, что суммарный коэффициент гармонических составляющих высших гармоник (СКГСН) или Total Harmonic Distortion Voltage (THD(U)) составляет 0,05 %, что соответствует ГОСТ 32144 – 2013. Анализ гармонического состава по току показал, что суммарный коэффициент гармонических составляющих высших гармоник (СКГСТ) или Total Harmonic Distortion Current (THD(I)) составляет 0,05 %. Данный параметр не является регламентируемым ГОСТ.

На рис. 4.27 представлены формы сигнала по напряжению и току, а также гармонический состав по напряжению и току на выходе понизительной подстанции энергопоезда, питающей забойный конвейер и перегружатель после подключения активного фильтра высших гармоник. Анализ гармонического состава по напряжению показал, что суммарный коэффициент гармонических составляющих высших гармоник (СКГСН) или Total Harmonic Distortion Voltage (THD(U)) составляет 4,95 %, что соответствует ГОСТ 32144 – 2013. Анализ гармонического состава по току показал, что суммарный коэффициент гармонических составляющих высших гармоник (СКГСТ) или Total Harmonic Distortion Current (THD(I)) составляет 7,50 %. Данный параметр не является регламентируемым ГОСТ. Сравнительный анализ гармонического состава по напряжению до и после подключения активного фильтра высших гармоник, представлен в табл. 4.4. и рис. 4.28.

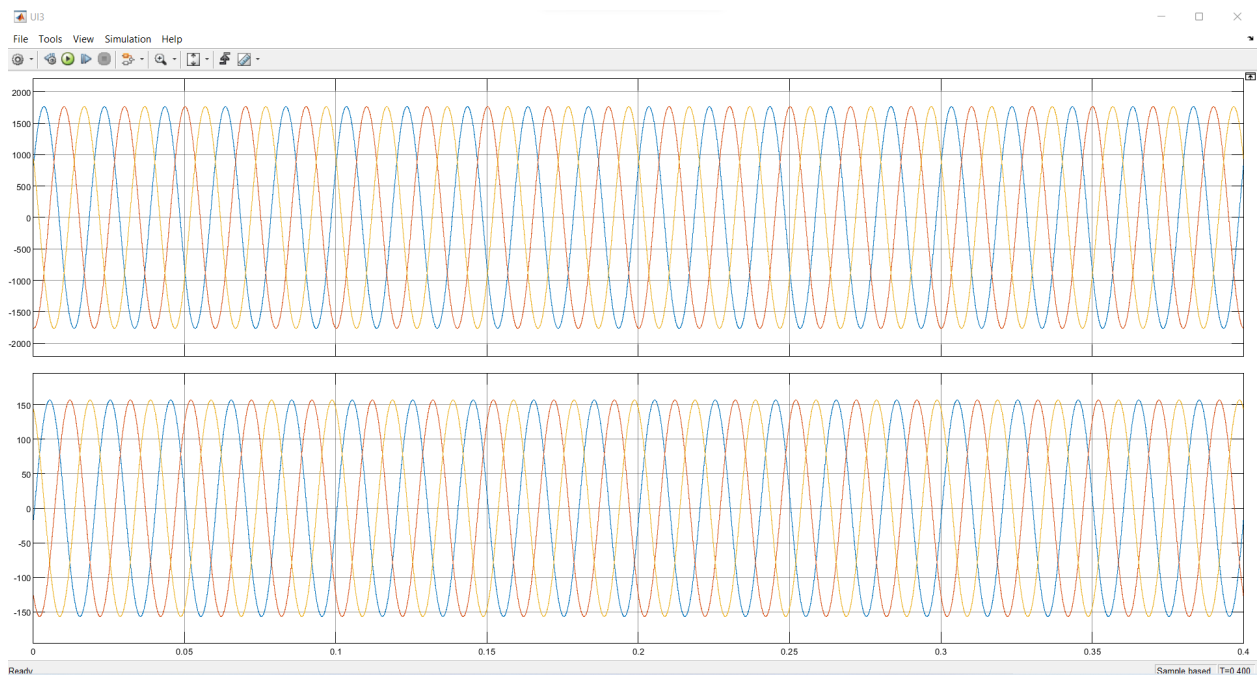


Рисунок 4.25 - Осциллограммы напряжения и тока на выходе понизительной подстанции энергопоезда, питающей дробилку

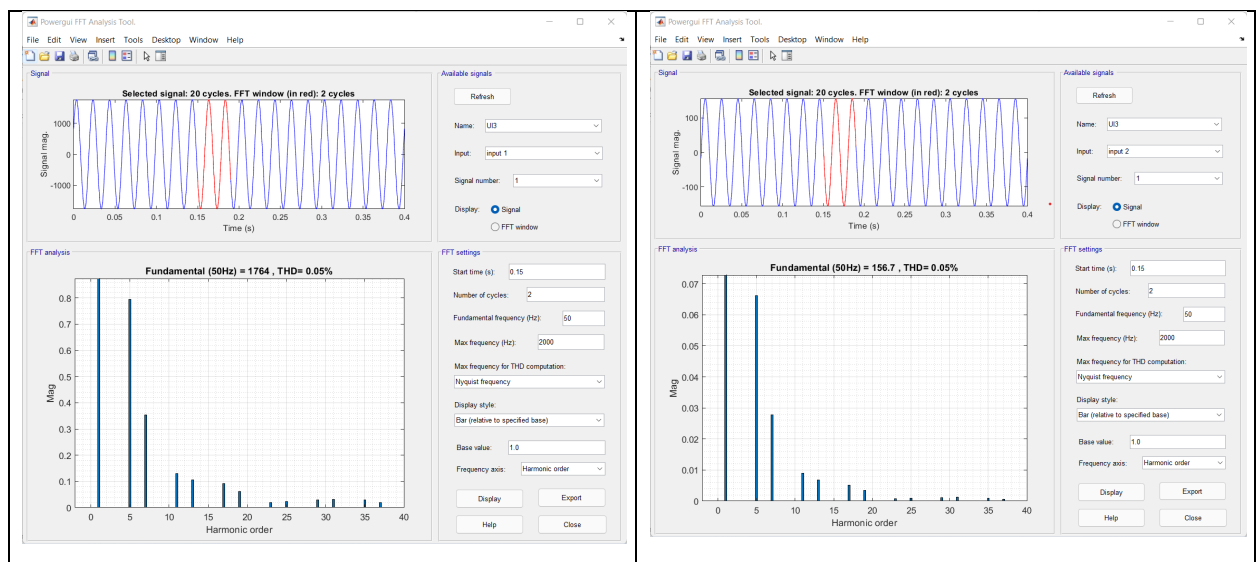


Рисунок 4.26 - Формы сигнала по напряжению и току, а также гармонический состав по напряжению и току на выходе понизительной подстанции энергопоезда, питающей дробилку

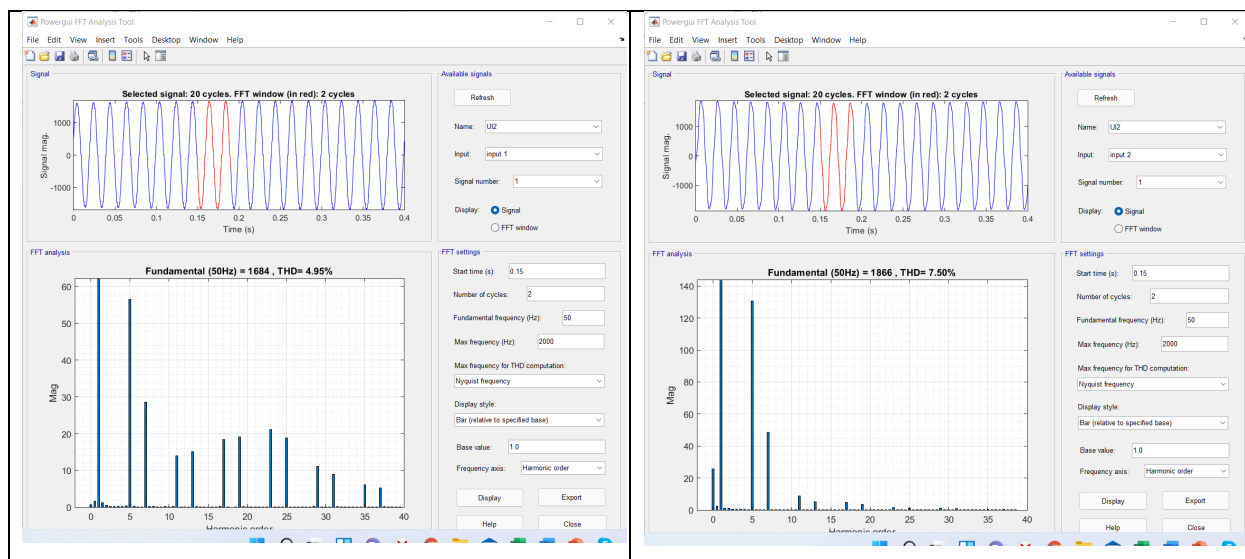


Рисунок 4.27 - Формы сигнала по напряжению и току, а также гармонический состав по напряжению и току на выходе понизительной подстанции энергопоезда, питающей забойный конвейер и перегружатель после подключения активного фильтра высших гармоник

Таблица 4.4 - Сравнительный анализ гармонического состава по напряжению до и после подключения фильтра высших гармоник

Номер гармоники	Уровень гармонической составляющей до подключения фильтра, %	Уровень гармонической составляющей после подключения фильтра, %	Номер гармоники	Уровень гармонической составляющей до подключения фильтра, %	Уровень гармонической составляющей после подключения фильтра, %
3	0	0	23	1,5	2,1
5	16	5,5	25	1,0	1,9
7	7,5	2,9	27	0	0
9	0	0	29	1,2	1,1
11	5,5	1,4	31	1,0	0,9
13	3,5	1,6	33	0	0
15	0	0	35	1,0	0,6
17	2,0	1,8	37	0,9	0,5
19	1,5	1,9	39	0	0
21	0	0			



Рисунок 4.28 - Сравнительный анализ гармонического состава по напряжению до и после подключения активного фильтра высших гармоник

Сравнительный анализ результатов суммарного значения напряжений гармонических составляющих (THD (U)) показал снижение показателя с 11,72 % до 4,95 % (снижение составило 57,8 %), что подтверждает эффективность использования активного фильтра высших гармоник в подземных электрических сетях выемочных участков угольных шахт.

Сравнительный анализ результатов суммарного значения токов гармонических составляющих (THD (I)) показал повышение показателя с 5,27 % до 7,50 % (повышение составило 30 %).

В рамках поставленной в работе задачи, было проведено исследование динамики изменения коэффициента THD (U) с помощью имитационного моделирования при изменении параметров активного фильтра высших гармоник: накопительной емкости и индуктивности входного дросселя. Результаты проведенного исследования представлены в табл. 4.5 и 4.6.

Таблица 4.5 – Результаты исследования динамики коэффициента THD (U) в зависимости от емкости накопительного конденсатора АФВГ

C, мкФ	THD (U), %
70	5,63
80	5,61
90	5,51
100	5,44
200	5,21
300	5,12
400	5,08
500	5,04
600	5,01
700	4,98
800	4,95
900	4,9
1000	4,87

Таблица 4.6 – Результаты исследования динамики коэффициента THD (U) в зависимости от индуктивности входного дросселя АФВГ

L, Гн	THD (U), %
0,001	18,23
0,002	16,88
0,003	12,06
0,004	9,49
0,005	7,24
0,006	7,95
0,007	7,23
0,008	6,71
0,009	6,61
0,01	6,36
0,02	5,78
0,03	5,57
0,04	5,41

По результатам имитационного моделирования, приведенными в табл. 4.5, табл. 4.6, рис. 4.29, рис. 4.30, рис. 4.31, рис. 4.32 были построены зависимости (рис. 4.33, рис. 4.34), описанные уравнениями регрессии и проведено исследование качества уравнений регрессии (табл. 4.7).

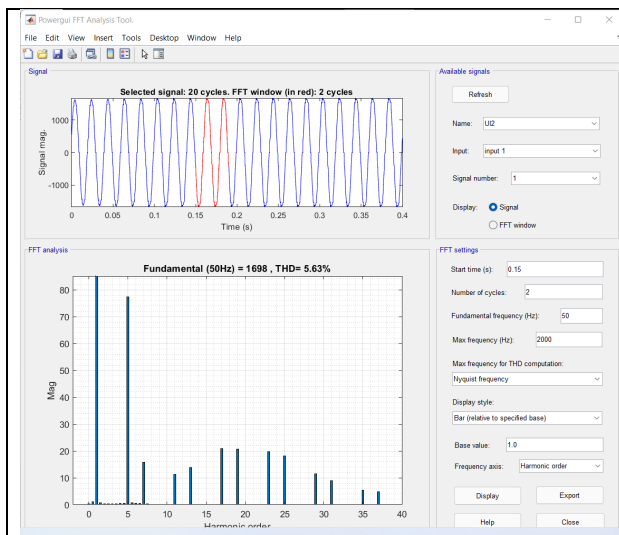


Рисунок 4.29 - Формы сигнала по напряжению, а также гармонический состав по напряжению на выходе понизительной подстанции энергопоезда, питающей забойный конвейер и перегружатель после подключения активного фильтра высших гармоник (при $C=70$ мкФ)

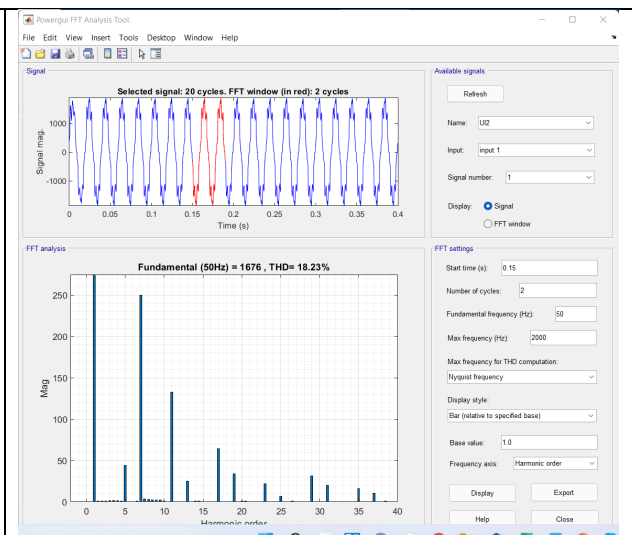


Рисунок 4.30 - Формы сигнала по напряжению, а также гармонический состав по напряжению на выходе понизительной подстанции энергопоезда, питающей забойный конвейер и перегружатель после подключения активного фильтра высших гармоник (при $L=0,001$ Гн)

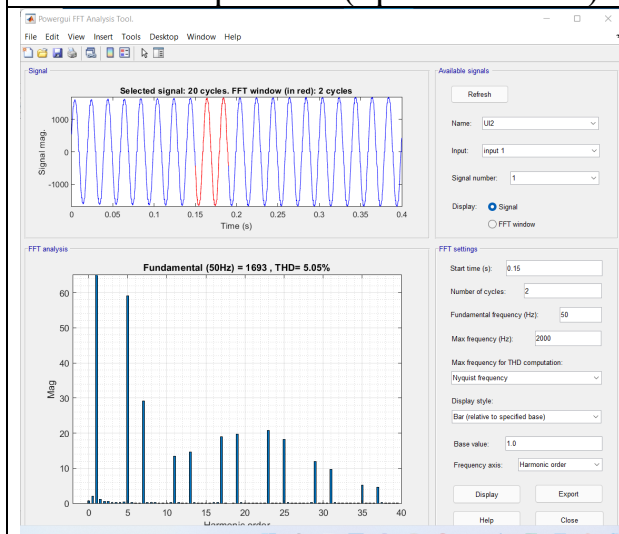


Рисунок 4.31 - Формы сигнала по напряжению, а также гармонический состав по напряжению на выходе понизительной подстанции энергопоезда, питающей забойный конвейер и перегружатель после подключения активного фильтра высших гармоник (при $C=500$ мкФ)

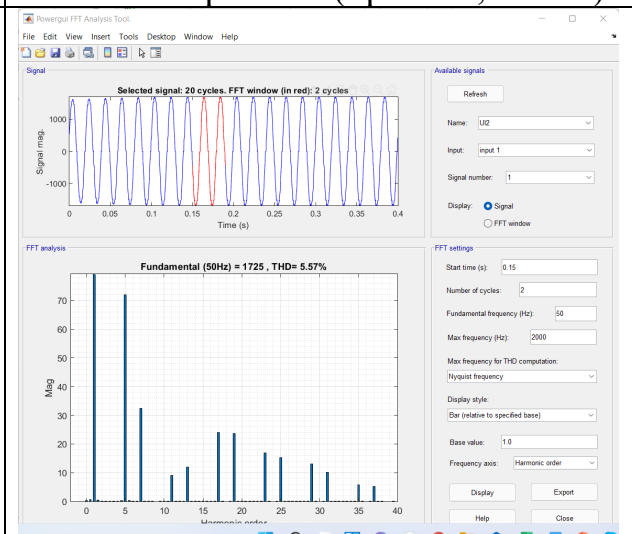


Рисунок 4.32 - - Формы сигнала по напряжению, а также гармонический состав по напряжению на выходе понизительной подстанции энергопоезда, питающей забойный конвейер и перегружатель после подключения активного фильтра высших гармоник (при $L=0,03$ Гн)

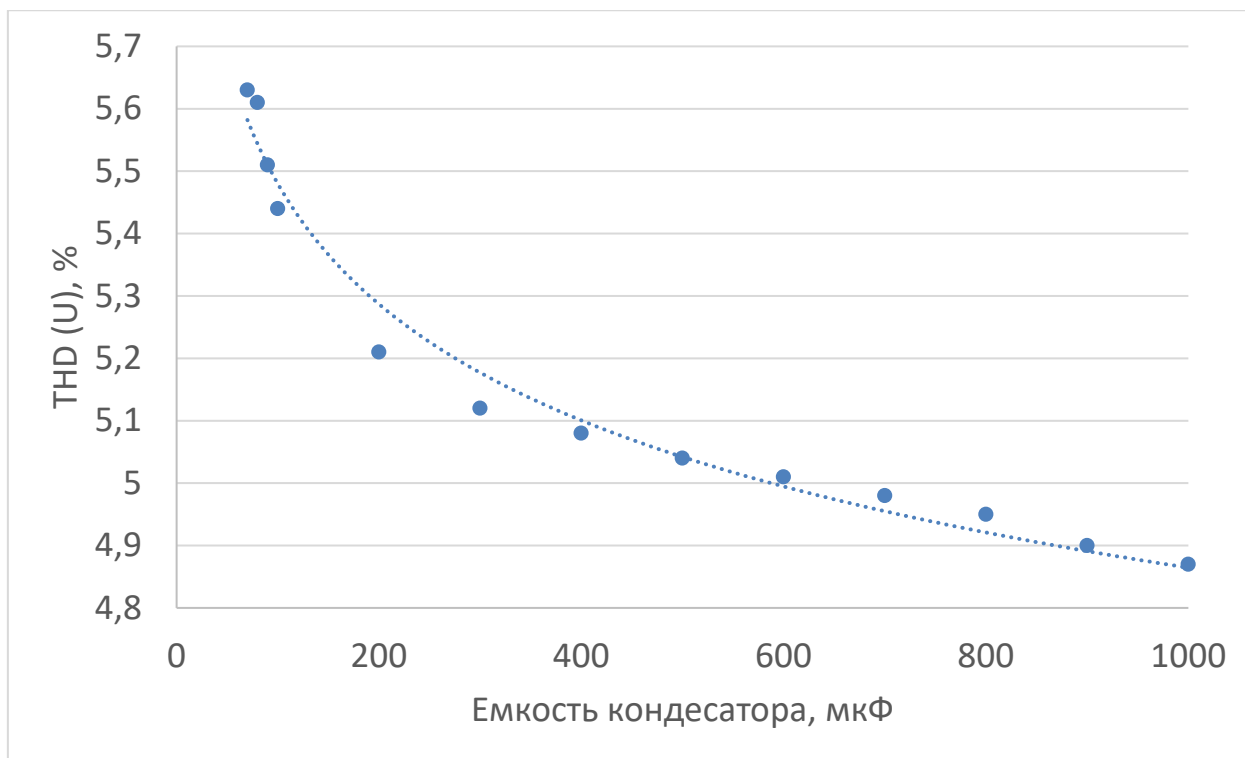


Рисунок 4.33 – Динамика коэффициента THD (U) в зависимости от емкости накопительного конденсатора АФВГ

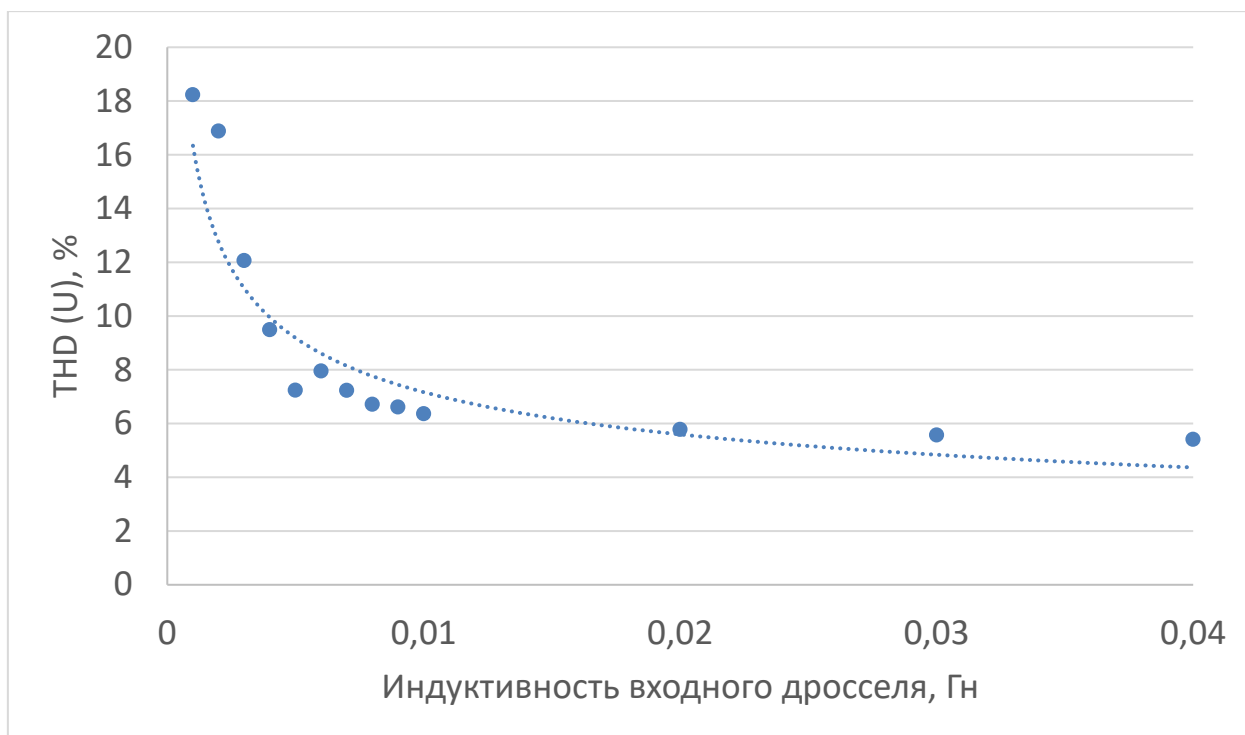


Рисунок 4.34 – Динамика коэффициента THD (U) в зависимости от индуктивности входного дросселя АФВГ

Таблица 4.7 - Исследование качества полученных уравнений регрессии

№	Параметр	Уравнение	Показатель	Значение
1	Емкость накопительного конденсатора АФВГ	$THD(U) = 6,96 * C^{-0.052}$	Коэффициент детерминации	0,98
			Средняя ошибка аппроксимации	0,58 %
2	Индуктивность входного дросселя АФВГ	$THD(U) = 1,38 * L^{-0.358}$	Коэффициент детерминации	0,87
			Средняя ошибка аппроксимации	13,29 %

4.5 Выводы

Исследования, проведенные в данной главе, позволили сделать следующие выводы:

1. Разработана имитационная модель системы электроснабжения выемочного участка высокопроизводительной угольной шахты на базе схемы электроснабжения, позволившая исследовать гармонический состав электрической сети;

2. Проведенное имитационное моделирование подтверждает возможность демпфирования высших гармоник в подземных электрических сетях угольных шахт с помощью активного фильтра;

3. Доказана эффективность снижения суммарного коэффициента напряжений гармонических составляющих ($THD(U)$) за счет использования активного фильтра высших гармоник в системе электроснабжения выемочного участка (11,72 % до 4,95 %);

4. Получены зависимости по динамике суммарного коэффициента напряжений гармонических составляющих $THD(U)$ в зависимости от индуктивности входного дросселя и емкости накопительного конденсатора активного фильтра высших гармоник.

Глава 5. Рекомендации и техническое устройство по повышению показателей качества электрической энергии в подземных электрических сетях угольных шахт

5.1 Методическое обоснование структуры устройства автоматизированного мониторинга показателей качества электроэнергии

Решению поставленной научно - прикладной задачи способствует разработанное устройство автоматизированного мониторинга качества электрической энергии [62, 77]. Устройство предназначено для работы в сетях напряжением выше 1 кВ (1140 В, 3300 В, 6600 В) в среде, опасной по внезапным выбросам газа и пыли. На рис. 5.1 представлена структурная схема данного устройства.

Высоковольтное устройство автоматизированного мониторинга качества электрической энергии в подземных сетях угольных шахт относится к устройствам, предназначенным для контроля качества электрической энергии в угольных шахтах, опасных по внезапным выбросам газа и пыли. Технический результат предложения – возможность создания системы автоматизированного мониторинга параметров качества электрической энергии в подземных сетях угольных шахт, повышение качества электроэнергии и уменьшение затрат на создание участковых подземных систем электроснабжения [62, 77]. Этот результат достигается тем, что высоковольтное устройство автоматизированного мониторинга качества электрической энергии в подземных сетях угольных шахт, содержащее запоминающее устройство и сетевой интерфейс RS-485, снабжено измерительными трансформаторами, анализатором качества электрической энергии со встроенным контроллером реактивной мощности, медиаконвертером, активным фильтром высших гармоник, резервным источником питания, понижающим трансформатором для питания анализатора качества электрической энергии и понижающим трансформатором с неуправляемым выпрямителем [62, 77].

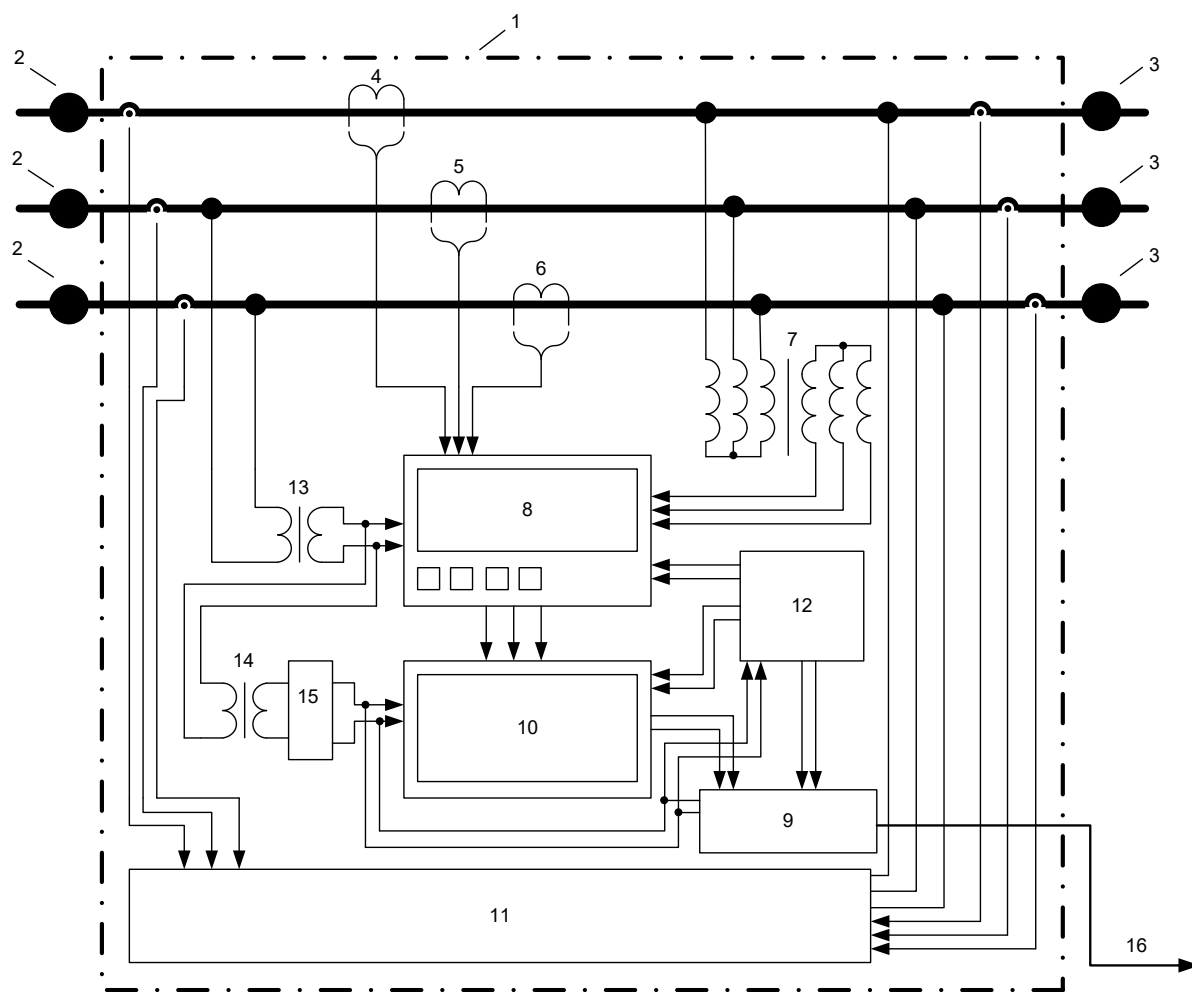


Рисунок 5.1 - Структурная схема высоковольтного переносного устройства автоматизированного мониторинга качества электрической энергии в подземных сетях угольных шахт, в том числе опасных по внезапным выбросам газа и пыли

Предлагаемое переносное устройство во взрывозащищенной оболочке 1 состоит из трех измерительных трансформаторов тока 4, 5, 6, измерительного трехфазного трансформатора напряжения 7, анализатора качества электрической энергии 8 со встроенным контроллером реактивной мощности, медиаконвертера 9, запоминающего устройства 10, активного фильтра высших гармоник 11, резервного источника питания 12, понижающего трансформатора 13 для питания анализатора качества электрической энергии 8 со встроенным контроллером реактивной мощности, понижающего трансформатора 14 с неуправляемым выпрямителем 15 для питания медиаконвертера 9 и запоминающего устройства 10, а также для подзаряда аккумуляторов резервного источника питания 13.

Устройство предусматривает технологию Ethernet (10/100 mb/s), организованную по медным или оптическим линиям связи, а также может иметь дополнительные средства коммутации связи при использовании сетевого интерфейса RS-485 16 для создания с помощью технологии Ethernet локальной сети [62, 77].

Устройство работает следующим образом.

Высоковольтное переносное устройство 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 качества электрической энергии со встроенным контроллером реактивной мощности 8. Для контроля качества напряжения на анализатор качества электрической энергии со встроенным контроллером реактивной мощности 8 поступает напряжение сети через измерительный трехфазный трансформатор напряжения 7. Питание анализатора качества электрической энергии со встроенным контроллером реактивной мощности 8 осуществляется от понижающего трансформатора 13. С анализатора качества электрической энергии 8 цифровые сигналы управления поступают на медиаконвертер 9, служащий преобразователем

сигналов для дальнейшей их передачи по линиям связи и на запоминающее устройство 10. Сигнал с анализатора качества электрической энергии со встроенным контролером реактивной мощности 8 поступает на активный фильтр высших гармоник 11, который ограничивает негативное влияние гармонического состава сети в автоматическом режиме. Для питания медиаконвертера 9 и запоминающего устройства 10 предусмотрен понижающий трансформатор 14 с неуправляемым выпрямителем 15, производящий подзарядку аккумуляторных батарей источника питания 12, служащего для резервного питания устройства [62, 77].

С помощью данного устройства можно осуществлять автоматизированный мониторинг показателей качества энергии, производить учет фактического коэффициента мощности и соответственно повышать его до нормативного значения, что позволит обеспечить эффективную работу подземных потребителей угольных шахт. Применение предлагаемого устройства поможет оперативно реагировать на изменение уровня напряжения в подземных электрических сетях, планировать рациональное размещение энергопоездов, тем самым снижая затраты на создание участков подземных систем электроснабжения [62, 77].

Предложенное устройство будет способствовать созданию современной автоматизированной информационно-измерительной системы непрерывного мониторинга качества электрической энергии с возможностью автоматизированного воздействия на показатели качества энергии [56, 62, 77, 87].

Установка данного устройства на ряде понизительных подстанций различных потребителей угольных шахт будет способствовать созданию современной АИИСТУЭЭ (автоматизированную информационно-измерительную систему технического учета электрической энергии) подземных потребителей угольных шахт, опасных по внезапным выбросам газа и пыли [56, 62].

5.2 Обоснование местоположения устройства повышения качества электрической энергии в условиях воспроизводительных угольных шахт

Вместе с тем возникает задача обоснования местоположения данного устройства. Следует отметить, что данное устройство должно быть установлено, по возможности, в системе электроснабжения подземных потребителей, максимально приближенным к источникам высших гармоник.

Для обоснования точек установки предлагаемого устройства используется однолинейная упрощенная схема электроснабжения шахты «Полысаевская» АО «СУЭК-Кузбасс» (рис. 2.4). Проведенный анализ электромеханических систем основного технологического оборудования шахты, расположенного как на поверхности, так и в условиях подземных горных выработок позволил построить имитационную модель системы электроснабжения высокопроизводительной угольной шахты и результаты моделирования гармонического состава при подключении нелинейного потребителя (подъемной установки) (рис. 5.2) и при его отключении (рис. 5.3). Имитационная модель состоит из следующих элементов: трехфазный программируемый источник переменного напряжения, с помощью которого задается напряжение, поступающее на угольную шахту (3-Phase Source); трехфазный универсальный измеритель (Three-Phase V-I Measurement), позволяющий оценить формы сигнала на источнике напряжения и тока при отсутствии системы компенсации высших гармонических составляющих и при включении ее; осциллограф Scope; анализатор суммарного коэффициента гармонических составляющих по напряжению (THD(U)); система Powergui, служащая для дополнительного анализа, в том числе по гармоническому составу системы, имитационной модели. Кроме того, представлен трансформатор ГПП, кабельные линии (KL1 и KL2), имитационная модель нелинейной нагрузки (Подъемная установка) и выемочный участок в виде активно-индуктивной нагрузки.

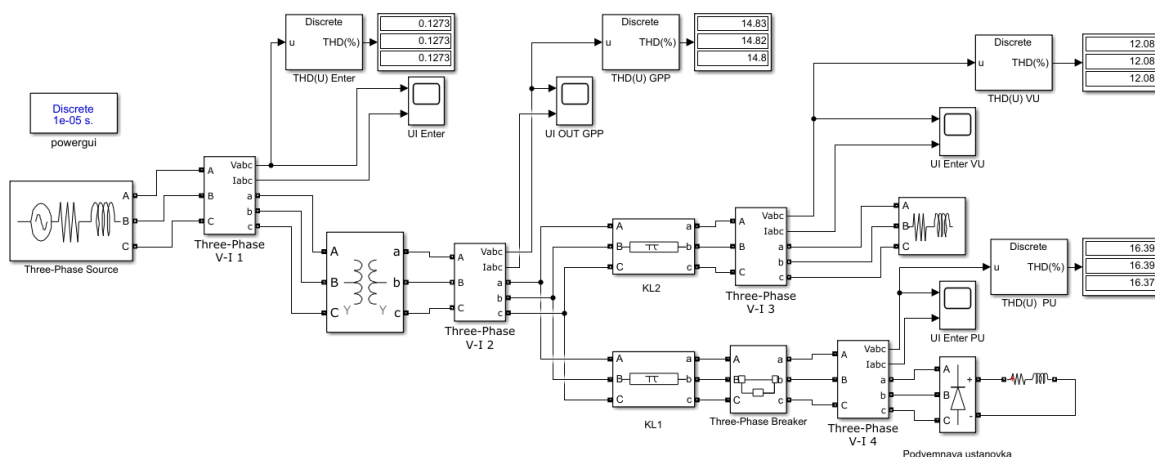


Рисунок 5.2 – Имитационная модель системы электроснабжения высокопроизводительной угольной шахты и результаты моделирования гармонического состава при подключении нелинейного потребителя (Подъемная установка)

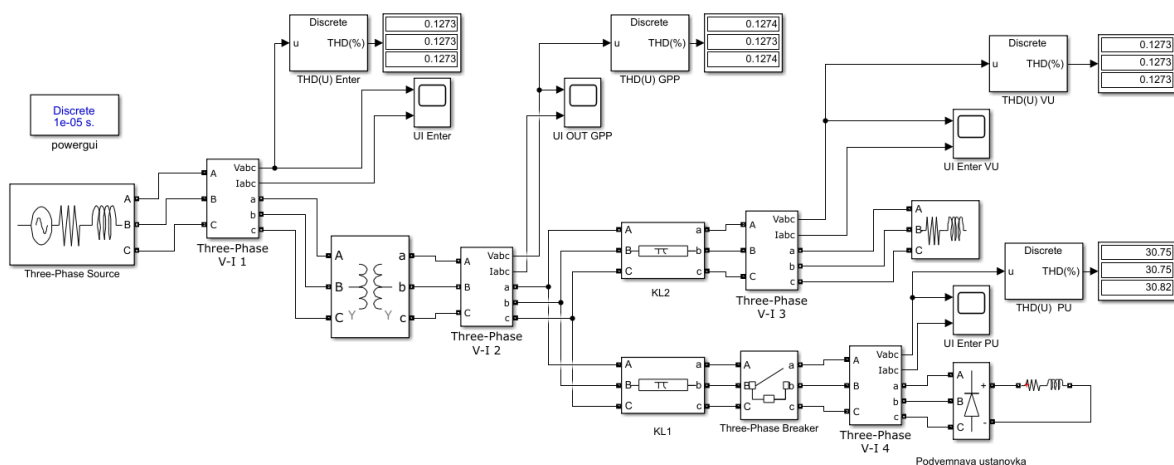


Рисунок 5.3 - Имитационная модель системы электроснабжения высокопроизводительной угольной шахты и результаты моделирования гармонического состава при отключении нелинейного потребителя (Подъемная установка)

Результаты моделирования представлены на конкретных элементах модели с помощью блока THD (U) %. На рис. 5.4 – 5.9 представлены формы сигнала по напряжению и току, а также гармонический состав по напряжению и току по каждому элементу системы электроснабжения имитационной модели. Следует отметить, что на этих имитационных моделях имеется ряд измерительных элементов, позволяющие провести анализ влияния высших гармоник на потребители угольной шахты.

Согласно проведенному исследованию подтверждено наличие высших гармоник в системе электроснабжения угольной шахты, в частности, при подключении подъемной установке на понизительной подстанции ГПП THD (U) составил 14,8 %, а на вводе выемочного участка THD (U) - 12,08 %. При отключенной подъемной установке на понизительной подстанции ГПП THD (U) составил 0,13 %, на вводе выемочного участка THD (U) составил 0,13 %. Это подтверждает необходимость установки фильтров высших гармоник на выходе подъемной установки.

Следует отметить, что оболочки устройств будут отличаться в зависимости от места установки. Взрывозащищенные устройства непрерывного мониторинга качества электрической энергии будут располагаться в условиях подземных горных выработок, а в рудничном нормальном исполнении будут располагаться на поверхности угольной шахты. На рис. 5.10 указаны места установки устройств, в частности, синим цветом обозначены места установки на поверхности угольной шахты, красным цветом устройства, установленные в подземных горных выработках.

Места установки данных устройств характерны для потребителей с элементами силовой преобразовательной техники. Проведенный анализ однолинейной схемы электроснабжения угольной шахты показал, что на шахте «Полысаевская» для снижения уровня влияния высших гармоник на технологические процессы необходима установка четырех устройств автоматизированного мониторинга качества

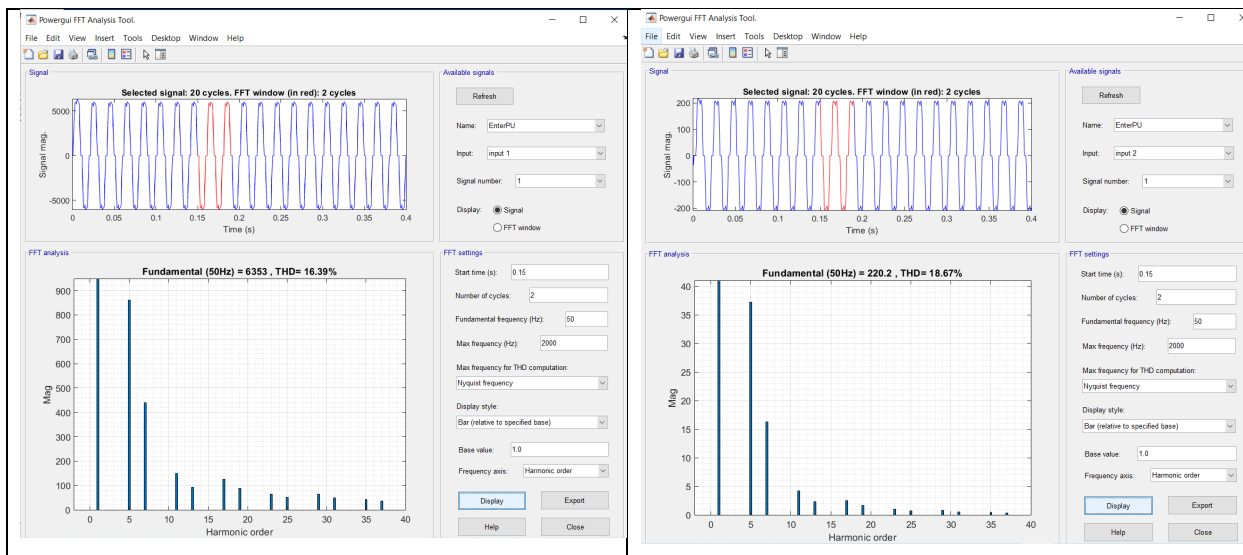


Рисунок 5.4 – Формы сигнала по напряжению и току, а также гармонический состав по напряжению и току на входе подъемной установки
(Подъемная установка подключена)

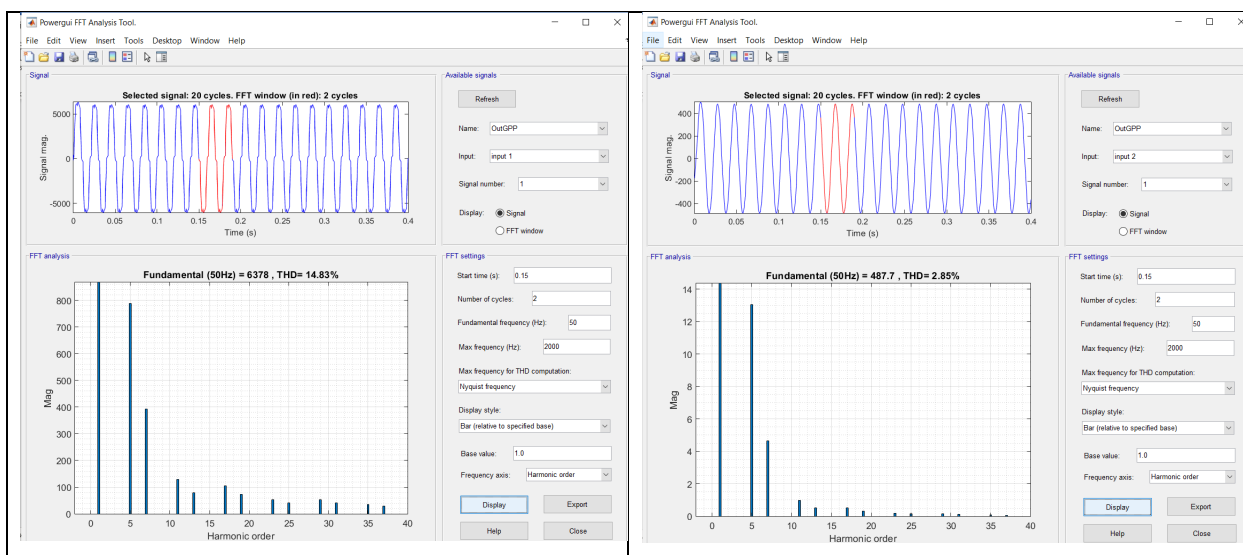


Рисунок 5.5 - Формы сигнала по напряжению и току, а также гармонический состав по напряжению и току на Главной понизительной подстанции
(Подъемная установка подключена)

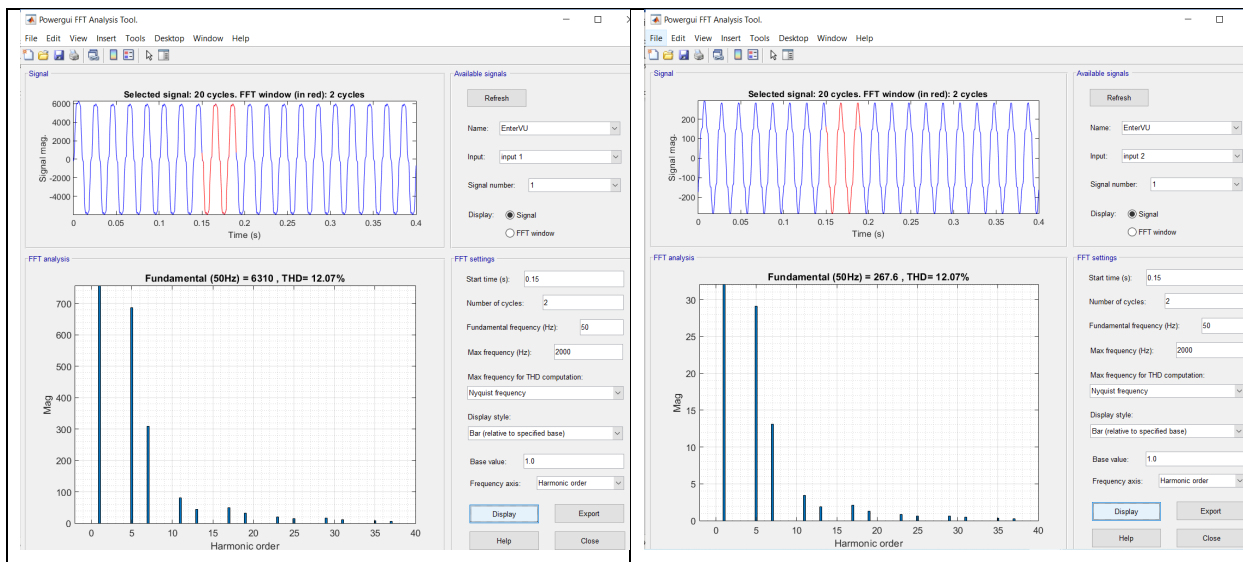


Рисунок 5.6 – Формы сигнала по напряжению и току, а также гармонический состав по напряжению и току на входе выемочного участка
(Подъемная установка подключена)

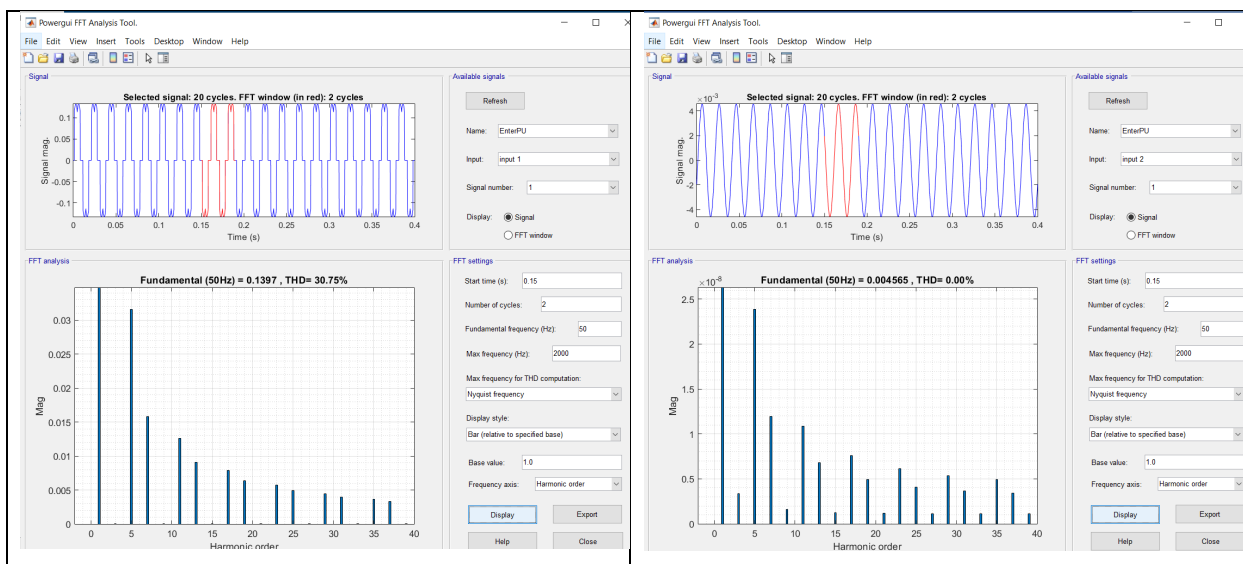


Рисунок 5.7 - Формы сигнала по напряжению и току, а также гармонический состав по напряжению и току на входе подъемной установки
(Подъемная установка отключена)

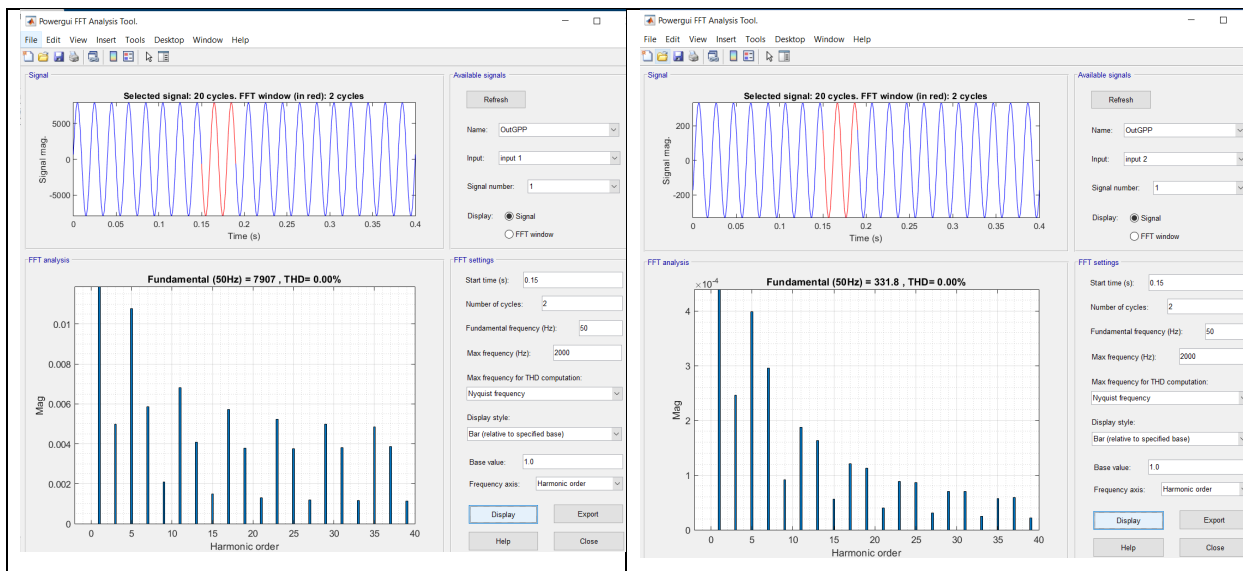


Рисунок 5.8 - Формы сигнала по напряжению и току, а также гармонический состав по напряжению и току на Главной понизительной подстанции (Подъемная установка отключена)

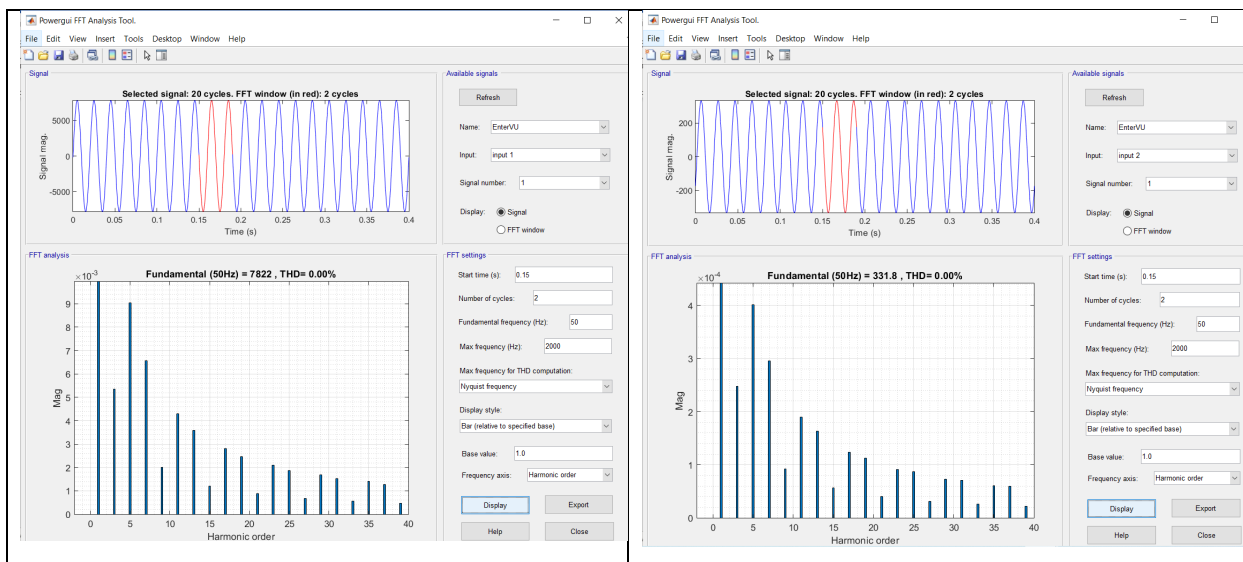


Рисунок 5.9 - Формы сигнала по напряжению и току, а также гармонический состав по напряжению и току на входе выемочного участка (Подъемная установка отключена)

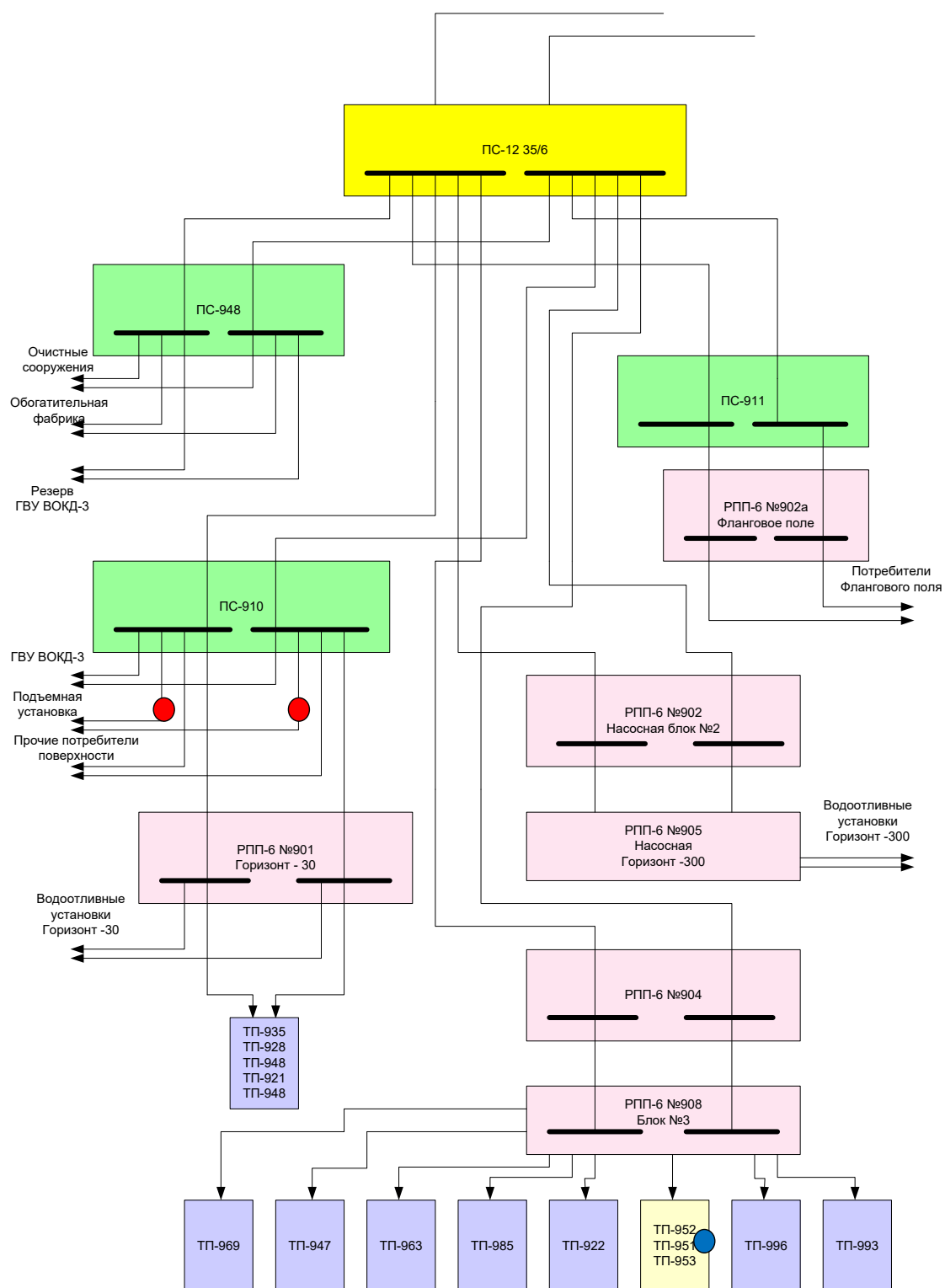


Рисунок 5.10 - Однолинейная упрощенная схема электроснабжения шахты «Полысаевская» АО «СУЭК-Кузбасс» с предлагаемым местом установки устройства

электрической энергии в нормальном рудничном исполнении: высоковольтные фидеры подъемной установки (ввод 1, ввод 2). Выбор данных мест установки обусловлен схемой управления подъемной установки, которая выполнена с использованием двигателя постоянного тока и реверсивного управляемого выпрямителя. Во взрывозащищенном исполнении – на выходе понизительной подстанции энергопоезда выемочного участка, питающей забойный конвейер и перегружатель.

Таким образом, основная рекомендация сводится к тому, что местоположением установки и точкой присоединения устройства мониторинга являются высоковольтные комплектные распределительные устройства, располагаемые после участкового энергопоезда для питания потребителей выемочного участка с регулируемым электроприводом. Под энергопоездом в данном случае понимается участковая передвижная трансформаторная подстанция, сочлененная с магнитной (магнитными) станцией управления или подстанциями с передвижным или полустационарным распредпунктом, составленным из автоматических выключателей и пускателей. При этом энергопоезда могут располагаться как на конвейерном штреке, так и вентиляционном в зависимости от угла залегания пласта и системы разработки.

5.3 Технико-экономическая оценка повышения уровня качества электрической энергии в условиях угольных шахт

В работе поставлена задача технико-экономической оценки повышения уровня качества электрической энергии в условиях высокопроизводительных угольных шахт, что позволит определить реальный вклад источников высших гармоник (конечных потребителей) в потери электрической энергии при ее транспортировке. Следует отметить, что величина потерь электроэнергии в системе электроснабжения, в том числе в условиях систем электроснабжения высокопроизводительных угольных шахт, является фактором, отражающим техническое состояние сетей и уровень эффективности их эксплуатации.

В настоящее время имеется ряд методик по определению электрических потерь в линиях электропередачи из-за наличия в них высших гармоник [12, 15, 16, 22, 26, 30, 46, 58, 68, 91]. Однако, применение их для в подземных электрических сетях высокопроизводительных угольных шахт весьма затруднительно.

Для получения величины объемов потерь электрической энергии от влияния высших гармоник был использована построенная имитационная модель, представленная ранее на рис. 4.12.

Для определения экономии электрической энергии в условиях высокопроизводительного выемочного участка угольной шахты, предлагается определить разницу между мгновенными активными мощностями потребителей при различных режимах работы т.е. с компенсацией высших гармоник и без компенсации.

Порядок расчета:

1. Определяется разность в мгновенной активной потребляемой мощности при различных режимах работы:

$$\Delta P = \sqrt{3} \cdot (U_2 - U_1) \cdot I \cdot \cos \varphi \cdot k_r = 193,68 \text{ кВт},$$

где: ΔP – разница в мгновенной активной потребляемой мощности при компенсации высших гармоник; $U_1 = \frac{U_{01}}{\sqrt{2}}$ – действующее значение питающего напряжения без компенсации высших гармоник (рис. 4.26); $U_2 = \frac{U_{02}}{\sqrt{2}}$ – действующее значение питающего напряжения с компенсации высших гармоник (рис. 4.30); I – действующее значение протекающего тока; $\cos\varphi$ – коэффициент мощности; k_r – коэффициент готовности забоя ($k_r = 0,6$).

2. Определяется разность между потребленной активной электрической энергией при различных режимах работы за сутки:

$$\Delta W_c = \Delta P \cdot t_c = 193,68 \cdot 10 = 1936,8 \text{ кВт*час},$$

где: ΔW_c – объем экономии электрической энергии в сутки от компенсации высших гармоник; t_c – число часов работы выемочного участка в сутки (две добывчные смены по 8 часов каждая, средняя величина простоя выемочного участка составляет порядка 3 часов в смену по техническим причинам (данные представлены компанией СУЭК-Кузбасс)).

3. Определяется разность между потребленной активной электрической энергией при различных режимах работы за год (с демпфированием высших гармоник и без):

$$\Delta W_r = \Delta W_c \cdot t_r = 1936,8 \cdot 270 = 522936 \text{ кВт*час},$$

где: ΔW_c – объем экономии электрической энергии в год от компенсации высших гармоник; t_r – среднее число рабочих дней выемочного участка в год (данные представлены компанией СУЭК-Кузбасс).

Согласно представленным данным от дирекции энергоуправления АО «СУЭК-Кузбасс», средняя стоимость 1 кВт*час на предприятиях составляет 2,5 рубля. Определяем ожидаемую экономию денежных средств (ЭЭ) за счет включения в схему электроснабжения выемочного участка устройства по компенсации высших гармоник:

$$\text{ЭЭ} = \Delta W_r \cdot c = 522936 \cdot 2,5 = 1307,34 \text{ тыс. рубл.},$$

где: ЭЭ – объем экономии денежных средств в год от компенсации высших гармоник; c – стоимость 1 кВт*час.

5.4 Выводы

Исследования, проведенные в данной главе, позволяют сделать следующие выводы:

1. Разработана структурная схема устройства автоматизированного контроля качества электроэнергии в подземных электрических сетях высокопроизводительных угольных шахт, включая опасные по внезапным выбросам газа и пыли, позволяющее демпфировать влияние высших гармоник (Патент на полезную модель №185421 от 04.12.2018 г.), и обосновано его местоположение в сети.
2. Питание мощных нелинейных потребителей поверхности должно осуществляться от отдельных источников электроэнергии, гальванически не связанных с подземными потребителями электрической энергии.
3. Проведен анализ результатов имитационного моделирования системы электроснабжения высокопроизводительного выемочного участка угольной шахты, позволивший определить ожидаемую экономию от демпфирования высших гармоник в подземных электрических сетях, которая составила 1307,34 тыс. рублей в год.
4. Дано обоснование местоположения устройств мониторинга и повышения качества электрической энергии в электрических сетях угольных шахт.

Заключение

В диссертационной работе дано новое решение актуальной научной задачи обоснования необходимости повышения качества электрической энергии в подземных электрических сетях угольных шахт высокой производительности.

На основе теоретических и экспериментальных исследований лично автором получены следующие результаты и выводы:

1. Анализ оборудования выемочных участков и систем электроснабжения угольных шахт позволил выявить наиболее распространенные и реализуемые схемные решения, а также источники высших гармоник в подземных электрических сетях.

2. Впервые для условий подземных электрических сетей шахт высокой производительности проведен анализ влияния различных преобразовательных устройств на сеть, которые являются причиной появления высших гармонических составляющих, оказывающих негативное влияние на работу электрооборудования.

3. Экспериментальные исследования показали, что на исследуемых подстанциях практически по всему спектру гармонического состава наблюдается превышение допустимых значений по коэффициенту n -й гармонической составляющей напряжения с преобладанием 5 и 7 гармоники, что свидетельствует о широком применении преобразовательных устройств на базе 6-пульсной мостовой схемы выпрямления.

4. Установлено, что фактическое значение суммарного коэффициента гармонической составляющей напряжения существенно отличается от нормируемых: для подстанций поверхности в пределах 2,15–2,7 раза, а в подземных электрических сетях – 2,14–2,26 раза.

5. Проведенный анализ существующих схемных решений активных фильтров высших гармоник позволил обосновать применение активных фильтров с параллельным подключением и емкостным накопителем энергии.

6. Впервые для подземных электрических сетей получены аналитические выражения, позволяющие определить накопительную емкость конденсатора и индуктивность входного дросселя активного фильтра в зависимости от напряжения и мощности, характерных для подземных электрических сетей высокопроизводительных угольных шахт.

7. Доказана эффективность снижения суммарного коэффициента напряжений гармонических составляющих (THD (U)) за счет использования активного фильтра высших гармоник в системе электроснабжения выемочных участков (с 11,73% до 4,95%).

8. Разработана структурная схема автоматизированного мониторинга качества электрической энергии в подземных электрических сетях высокопроизводительных угольных шахт, включая опасные по внезапным выбросам газа и пыли (Патент на полезную модель №185421 от 04.12.2018 г.) и обосновано его местоположение в сети.

9. Технико-экономическая оценка повышения уровня качества электрической энергии в условиях высокопроизводительных выемочных участков угольных шахт позволила определить ожидаемую экономию от демпфирования высших гармоник, которая составила 1307,34 тыс. рублей в год.

6. Литература

1. Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А. Проблемы обеспечения энергетической безопасности предприятий минерально-сырьевого комплекса // Записки Горного института. 2016. Т. 217. С. 132–139.
2. 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.
3. 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.
4. Бабокин Г.И. Развитие теории, методы и средства управления и защиты электромеханических систем горных машин с преобразователями частоты: дис. ... д-ра техн. наук: 05.09.03 Москва, 1996. - 494 с.
5. 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.
6. Басистый Е. Я. Возможности сокращения потребления электроэнергии на шахте // Энергосбережение (Украина). - 2002. - № 2. - С. 2-8.
7. 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.
8. 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.

9. 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.
10. Беляк В.Л., Миновский Ю.П. Обеспечение электробезопасности в шахтных участковых сетях напряжением 3300 В.// Безопасность труда в промышленности – 2007 - № 9.
11. 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.
12. 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". - Орёл: ОрёлГАУ, 2014. - 159 с.
13. Вагин Г.Я. К вопросу о повышении энергоэффективности промышленных предприятий // Промышленная энергетика. – 2013. – №5. – с. 2-6.
14. 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.
15. Гапеевков А.В. Анализ и разработка способов улучшения электромагнитной совместимости в автономных системах электроснабжения. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. -М.: МЭИ, 1999.-20 с.
16. Герман-Галкин С.Г. Виртуальная лаборатория полупроводниковых систем в среде Matlab-Simulink. – СПб.: Издательство «Лань», 2013 – 448 с.
17. Государственная программа РФ «Развитие угольной промышленности до 2030 г.». – М., 2014.

18. Государственная программа РФ «Энергосбережение и повышение энергоэффективности на период 2020 г.». – М.: Минэнерго РФ, 2010.
19. Государственная программа РФ «Энергоэффективность и развитие энергетики». – М., 2014
20. Гофман В.М., Миновский Ю.П. Регулирование электропотребления и экономия электроэнергии на угольных шахтах. – М.: Недра, 1988. – 190 с.
21. 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.
22. Гуляев Е.Н. Электромагнитная совместимость полупроводниковых преобразователей с сетью и нагрузкой: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 – Уфа, 2010. 175 с.
23. Гусейнов Ф.Г., Мамедяров О.С. Планирование эксперимента в задачах электроэнергетики. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 151 с.
24. Добрусин Л.А. Широкополосные фильтрокомпенсирующие устройства для тиристорных преобразователей. Электричество. 1985. № 4. - с. 4-18.
25. Добрусин Л.А., Павлюют А.Г. Влияние конденсаторов в составе фильтрокомпенсирующих устройств на несинусоидальность напряжения сети. Электричество. 1975. № 12.-с. 14-18.
26. 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.
27. 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.
28. 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.

29. Ершов М.С., Егоров А.В., Комков А.Н. Влияние частоты на устойчивость промышленных электротехнических систем. Промышленная энергетика. 2013. №9. С.21–25.
30. Ершов М.С., Конкин Р.Н. Методика экспериментального определения параметров источников питания промышленных систем электроснабжения. Промышленная энергетика. 2017. № 2. С. 34–39.
31. 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.
32. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий// - М: Энергоатомиздат, 1994. - 272 с.
33. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в установках поперечно-емкостной компенсации в промышленных сетях Электричество. -1973. - №11. - с. 40-46.
34. Жежеленко И.В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях/ - М: Энергоатомиздат, 1986.- 168 с.
35. Жежеленко И.В., Рабинович М.Л., Божко В.Н. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях - Киев: Техника, 1981.-160 с.
36. Жежеленко И.В., Рабинович М.Л., Божко В.Н., Вагин Г.Я. Эффективные режимы работы электротехнологических установок - Киев:. Техника, 1987. - 183 с.
37. Жежеленко И.В., Шиманский О.Б. Электромагнитные помехи в системах промышленных предприятий Киев:. Вища школа, 1986. - 120 с.
38. Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии. - М.: ЭНАС, 2009. - 456с.
39. Железко Ю.С. Стандартизация параметров электромагнитной совместимости в международной и отечественной практике. Электричество. - 1996.-№ 1.-с. 2-7
40. Железко Ю.С. Стратегия снижения потерь и повышения качества электроэнергии в электрических сетях. Электричество. 1992. № 5. - с. 6-12.

41. Железко Ю.С. Требования к отклонениям напряжения в точках присоединения потребителей к электрическим сетям общего назначения. Промышленная энергетика. 2001. №10. с 52-57.
42. Зарипов Ш.У. Оценка показателей качества напряжения в условиях Навоийского гидрометаллургического завода // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2011. - Специальный выпуск №3. С. 10-13.
43. Зарипов Ш.У. Повышение эффективности электроснабжения непрерывных технологических процессов гидрометаллургического производства. : дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 – Москва, 2011. 141 с.
44. Захарова А.Г., Разгильдеев Г.И. Структура энергопотребления и ресурсы энергосбережения на шахтах Кузбасса. Уголь. 2000. № 7 (892). С. 48-50.
45. Зацепин Е.П., Ладанов А.С., Захаров К.Д. Влияние качества электроэнергии на показания счетчиков. Промышленная энергетика. 2004. №5 с. 40- 44.
46. Зыкин Ф.А. Определение степени участия нагрузок в снижении качества электроэнергии// Электричество. -1992. -№11.- С. 13 - 19.
47. Ивакин В.Н., Худяков В.В. Синтез фильтров высших гармоник для промышленных предприятий и энергосистем. Электротехника. 1997. №3.- с.40-44.
48. Иванов В.С., Соколов В.И. Режимы потребления и качество электрической энергии систем электроснабжения промышленных предприятий. - М.: Энергоатомиздат, 1987.-336с.
49. 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.
50. Каплунов Д.Р. Развитие производственной мощности подземных рудников при техническом перевооружении. – М.: Издательство Наука, 1989, - 263 с.
51. Каплунов Д.Р., Калмыков В.Н., Рыльникова М.В. Комбинированная геотехнология. – М.: Руда и металлы, 2003. 560 с.

52. Карташев И.И., Тульский В.Н., Шамонов Р.Г. и др. Управление качеством электроэнергии. -М.: Изд-во. МЭИ, 2006. — 320 с.
53. Клишин В.И., Писаренко М.В. Научное обеспечение инновационного развития угольной отрасли. // Уголь. 2014. № 9 (1062). С. 42-46.
54. Константинов Б.А., Жежеленко И.В. Качество электрической энергии и электромагнитная совместимость электрооборудования предприятий Электричество. 1977. №3. с. 3 - 7.
55. 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
56. Кубрин С.С., Решетняк С.Н. Автоматизированная информационно-измерительная система технического учета электроэнергии для подземных горных работ. Горный журнал №1 2016 г. с. 87-90.
57. Кубрин С.С., Мосиевский А.А., Закоршменный И.М., Решетняк С.Н., Максименко Ю.М. Пути повышения энергетической эффективности подземных электрических сетей высокопроизводительных угольных шахт // Уголь №2 2022 стр. 4 – 9.
58. Курбацкий В.Г. Экономическая оценка влияния качества электроэнергии на работу электрооборудования России. Промышленная энергетика. -1990.-№4.- С. 12-16.
59. Кучумов Л.А., Спиридонов Л.В. Особенности расчета параметров фильтров высших гармонических для распределительных сетей переменного тока. Электричество. - 1974. - №1. - с. 19-26.
60. Липский А.М., Поляков Г.Н. Эксплуатационный контроль показателей качества электроэнергии в сетях действующих предприятий. - М.: МДНТП, 1983. -265 с.
61. 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.

62. 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.

63. 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.

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

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

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

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

68. 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.

69. 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.

70. Ордабаев М.Е. Повышение электромагнитной совместимости в системах электроснабжения при гармоническом воздействии: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 – Москва, 2009. 168 с.
71. Пивняк Г.Г. Жежеленко И.В., Папайка 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.
72. Пивняк Г.Г., Бешта А.С., Зайка В.Т., Разумный Ю.Т. Регулирование электропотребления на горнодобывающих предприятиях Украины. // Горный журнал. 2005. № 5. С. 101-102.
73. Пивняк Г.Г., Зайка В.Т., Самойленко В.В. Научные и методические основы эффективного использования электроэнергии на угольных шахтах Украины // Горный журнал. 2010. № 7. С. 92-96.
74. Плащанский Л. А., Зарипов Ш.У. Вероятностная модель формирования электрических нагрузок в условиях Навоийского ГМК // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2009. – Специальный выпуск №8. -С. 9-11.
75. 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.
76. Плащанский Л.А., Зарипов Ш.У. Параметры электрической сети при резонансных явлениях в системе электроснабжения Навоийского ГМК // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2011. - Специальный выпуск №3. С. 5-10.
77. 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.

78. Плащанский Л.А., Решетняк М.Ю. Актуальность оценки показателей качества электроэнергии в подземных электрических сетях угольных шахт. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) Mining Informational and analytical bulletin (scientific and technical journal). – № 48 (специальный выпуск). М.: Издательство «Горная книга» 2018 г. с.313-321.
79. 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.
80. Плащанский Л.А., Решетняк М.Ю. Анализ электромеханических систем выемочных комбайнов угольных шахт высокой производительности. "Энергобезопасность и энергосбережение" №3 2019 г. с. 17-21.
81. 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.
82. 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.
83. Плащанский Л.А., Решетняк М.Ю. Анализ гармонического состава в электрических сетях понизительных подстанций угольных шахт. Горный журнал №5 2020г. с. 63 – 67.

84. 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.
85. Пучков Л.А., Пивняк Г.Г. Электрификация горного производства. Учебник для вузов. –М: Издательство Московского государственного горного университета, 2007. – Т. 2. – 595 с.
86. 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.
87. Решетняк С.Н., Решетняк М.Ю. Актуальные аспекты повышения уровня энергоэффективности высокопроизводительных угольных шахт. Энергобезопасность и энергосбережение. №3 2017г. стр. 21-24.
88. Розанов Ю.К., Бурман А.П., Шакарян Ю.Г. Управление потоками электроэнергии и повышение эффективности электроэнергетических систем. Издательский дом «МЭИ». -М.: 2012. 336 с.
89. 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.
90. 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.
91. Самаров Е.К. Исследование и разработка многоканального анализатора качества электроэнергии повышенной точности: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 – Черкизово, 2006. 141 с.
92. 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.

93. 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.
94. 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 / GIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2019;4/7:184–193 DOI: 10.25018/0236-1493-2019-4-7-184-193
95. Трофимов Г.Г. Качество электроэнергии и его влияние на работу промышленных предприятий Алма-Ата: Изд-во КазНИИНТИ, 1986. - 216 с.
96. 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.
97. Хабигер Э. Электромагнитная совместимость. Основы ее обеспечения в технике - М.: Энергоатомиздат, 1995. - 304 с.
98. 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.
99. Шевченко В.В., Хевсуриани И.М., Буре А.Б. Подавление высших гармоник в трехфазных сетях переменного тока. Промышленная энергетика. 1996. №9,- с 19-23
100. Шевырёв Ю.В. Обоснование и повышение энергетических показателей регулируемых электроприводов буровых установок: дис. ... д-ра техн. наук: 05.09.03 М., 2005. 333 с.
101. Шевырёв Ю.В., Фёдоров О.В., Сарваров А.С. Современный технологический уклад и его ресурсное обеспечение // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2018. № 3. С. 82-90.

102. Шевырѐв 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.
103. 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.
104. Шпиганович А.Н., Огарков Н.М. Высоковольтное электрооборудование распределительных устройств: Учебное пособие. Часть 1 и 2. Липецк: ЛГГУ, 1998. -160с.
105. Щуцкий В.И., Волощенко Н.И., Плащанский Л.А. Электрификация подземных горных работ: Учебник для вузов – М.: Недра, 1986. – 364 с.
106. Ясученя С.В., Копылов К.Н., Артемьев В.Б., Демур В.Н., Мутыгулин А.В. Очистные комбайны. – М.: Издательство «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2014г. – 576 с.
107. 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.
108. 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.
109. Belington R. Gus tamer perception of interruption costs Canadian survey. - London .1983. pp. 12-16.
110. 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.

111. Hebin D. Pool prices contracts and regulation in the British electricity supply industry. 1992. № 3. pp. 89-105.
112. 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.
113. 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.
114. 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.
115. 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.
116. 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.
117. Petrochenkov A.B. An information of industrial electrotechnical complexes. Russian Electrical Engineering. 2015. Vol. 86. No. 6. pp. 692 – 696.
118. 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.
119. 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.

120. 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.
121. Sumper A., Bagini A. Electrical energy efficiency: technologies and applications, Wiley, New York, 2012, pp. 31 – 37.
122. 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.

7 Приложения

7.1 Приложение А



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ
КОМПЛЕКСНОГО ОСВОЕНИЯ НЕДР
ИМ. АКАДЕМИКА Н.В. МЕЛЬНИКОВА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИПКОН РАН)

111020, г. Москва, Крюковский тупик, д. 4
ИНН 7722013467/ КПП 772201001
Тел., факс: +7 (495) 360-89-60

« _____ » _____ 20__ г.

Исх. № _____

СПРАВКА

об использовании результатов диссертационной работы Решетняк
Марии Юрьевны на тему: Повышение качества электрической энергии
в подземных электрических сетях высокопроизводительных угольных
шахт

Одним из основных факторов эффективного функционирования высокопроизводительных угольных шахт является бесперебойное питание электроэнергией, соответствующего качества, подземных потребителей всего технологического цикла. Увеличение длин лав, а также мощностей и технологических режимов работы комплексно-механизированных забоев высокопроизводительных угольных шахт приводит к появлению высших гармоник с постоянно меняющимся спектром гармонических составляющих, резонансных явлений токов и напряжений ранее не характерных для подземных электрических сетей. Это ведет к недопустимому перегреву электродвигателей, силовых трансформаторов, кабелей и другого электрооборудования и увеличивает риски простоев.

Предлагаемые в диссертационной работе рекомендации по повышению уровня качества электрической энергии использованы для оптимизации энергоэффективности угледобычи при моделировании работы технологического оборудования в условиях подземной разработки газоносных угольных месторождений.

Директор ИПКОН РАН
Член-корр. РАН



В.Н. Захаров

7.2 Приложение Б





МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

СЕРТИФИКАТ

Настоящим подтверждаем, что

*Решетняк
Мария Юрьевна*

принял(а) участие в V Международном форуме
по энергоэффективности и развитию энергетики ENES 2016

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ДИРЕКТОРА
ДЕПАРТАМЕНТА МИНИСТЕРСТВА
ЭНЕРГЕТИКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Д.А. ЗУБОВ

РУКОВОДИТЕЛЬ ОРГКОМИТЕТА
МОЛОДЕЖНОГО ДНЯ ENES 2016,
ДИРЕКТОР ФОНДА «НАДЕЖНАЯ СМЕНА»

А.С. КОРОЛЕВ



V МЕЖДУНАРОДНЫЙ ФОРУМ
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ
И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ
РАЗВИТИЕ ЭНЕРГЕТИКИ

23-25 ноября 2016
Москва, ВК Гостиный двор



XXVI Международный научный
симпозиум «Неделя горняка – 2018»

СЕРТИФИКАТ УЧАСТНИКА

Решетняк

Мария Юрьевна

Национальный исследовательский

технологический университет «МИСиС»

принял участие в XXVI Международном научном симпозиуме
«Неделя горняка – 2018», приуроченном к празднованию
100-летнего юбилея университета.

29 января - 2 февраля 2018 года
Москва, Горный институт НИТУ «МИСиС»

Директор Горного института
НИТУ «МИСиС»
А.В. Мясков

ПОДЗЕМНАЯ
**УГЛЕ-
ДОБЫЧА**
XXI век

МЕЖДУНАРОДНАЯ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ



СЕРТИФИКАТ

УЧАСТНИКА
МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
«ПОДЗЕМНАЯ УГЛЕДОБЫЧА XXI ВЕК»

РЕШЕТНЯК

МАРИЯ ЮРЬЕВНА

Генеральный директор
АО «СУЭК-Кузбасс»

Е.П. Ютяев

10-14 сентября 2018 года
г. Ленинск-Кузнецкий

Infinity publishing

International Conference
«SCIENTIFIC RESEARCH OF THE SCO COUNTRIES:
SYNERGY AND INTEGRATION»

CERTIFICATE

Reshetnyak Maria Yurievna

Topical aspects of assessing the quality of electricity
in underground coal mine networks

Location: _____ Haidian, Beijing, PRC

Date: _____ May 31, 2019

Co-chairman, Ph.D., Associate Professor: _____ Khismotullin D.R.

Co-organizer (for foreign participants): _____ Infinity publishing



НЕДЕЛЯ ГОРНЯКА

XXVIII Международная
научная
симпозиум

2020

СЕРТИФИКАТ

Решетняк Мария Юрьевна

принял(а) участие в качестве спикера в XXVIII Международном
научном симпозиуме «Неделя горняка-2020»
с докладом

***Обоснование способов повышения качества электрической
энергии в подземных электрических сетях
высокопроизводительных угольных шахт
на сессии***

***Энергетика и повышение энергоэффективности
промышленных предприятий***

Директор Горного
института НИТУ «МИСИС»
А.В. Мясков

