

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

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

РЕШЕТНЯК Мария Юрьевна

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

Специальность 2.4.2 – «Электротехнические комплексы и системы»

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель - канд. техн. наук, профессор

Плащанский Л.А.

Москва 2022

Общая характеристика работы

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 условиями 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 фильтра, 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.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность работы, указаны ее цель и идея, показаны новизна научных положений, практическая ценность и реализация работы.

В первой главе проведен анализ основного технологического оборудования угольных шахт, анализ влияния показателей качества электрической энергии на работу оборудования и подземных электрических сетей, анализ исследований качества электрической энергии в электрических сетях угольных шахт, а также обосновываются задачи исследования.

Разработкой и внедрением новых систем электроснабжения с учетом применения современной преобразовательной техники, в том числе для предприятий минерально-сырьевого комплекса, занимается ряд исследовательских университетов, а именно: Санкт-Петербургский государственный горный университет; Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»; Национальный исследовательский университет «МЭИ»; Национальный исследовательский университет «РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина», Национальная горная академия (Днепр, Украина); Кузбасский государственный технический университет; Липецкий государственный технический университет и другие. Развитие данных научных исследований обусловлено использованием современной преобразовательной техники в условиях подземных горных выработок высокопроизводительных угольных шахт для регулирования режимов работы оборудования и, как следствие этого, существенное проявление высших гармоник в электрических сетях угольных шахт. Указанные обстоятельства обусловили возникновение проблемы электромагнитной совместимости в электрических сетях угольных шахт, включая подземные электрические сети.

Большой вклад в развитие теории электромагнитной совместимости, в частности повышения качества электрической энергии в условиях промышленных предприятий, внесли следующие ученые: Б.Н. Абрамович, Дж. Арриллагги, 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.

Вопросы электромагнитной совместимости, включая электрические сети, детально рассмотрены для горнодобывающих предприятий, производящих добычу полезного ископаемого (руды или угля) открытым способом, добычу нефте-газового сырья, а также для обогатительных производств.

Исследованиям электромагнитной совместимости в условиях подземных горных выработок угольных шахт, в том числе опасных по внезапным выбросам газа и пыли, не уделено достаточного внимания. Это обусловлено определенными трудностями с экспериментальными исследованиями параметров качества электрической энергии в

специфических условиях подземных горных выработок из-за отсутствия соответствующего оборудования во взрывозащищенном исполнении с искробезопасным подключением к питающей сети.

В главе проведен анализ методов и технических средств повышения качества электрической энергии в условиях угольной шахты, в результате чего были определены пути повышения качества электрической энергии в подземных электрических сетях угольных шахт, в том числе опасных по внезапным выбросам газа и пыли.

Вторая глава посвящена исследованию качества электроэнергии в электрических сетях угольных шахт. Методика проведения экспериментальных исследований представлена в виде алгоритма (рис.1), а места установки анализаторов качества электрической энергии - в соответствии со схемой электроснабжения. Экспериментальные исследования проводились на угольных шахтах «Полысаевская» и «им. С.М. Кирова» АО «СУЭК-Кузбасс»: на понизительных подстанциях поверхности устанавливался анализатор «Ресурс UF2МВ-3П15-5», в подземных условиях устанавливался анализатор «UPM 3080».

Анализ результатов исследования показателей качества электроэнергии на понизительных подстанциях ПС-12, ПС-910 и ПС-948 шахты «Полысаевская» позволяет сделать вывод, что приведённые показатели качества электрической энергии соответствуют предъявляемым требованиям во всех точках контроля, а именно: отклонению частоты; коэффициенту искажения синусоидальности напряжения; коэффициенту несимметрии напряжений по обратной последовательности.

Сравнительный анализ показателей качества электроэнергии на подстанциях (рис. 2) по коэффициенту n -й гармонической составляющей напряжения показал, что практически по всему спектру гармонического состава наблюдается превышение допустимых значений, что является нарушением ГОСТ 32144–2013. Особенно это характерно для 5 и 7 гармоник: 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; 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.

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.

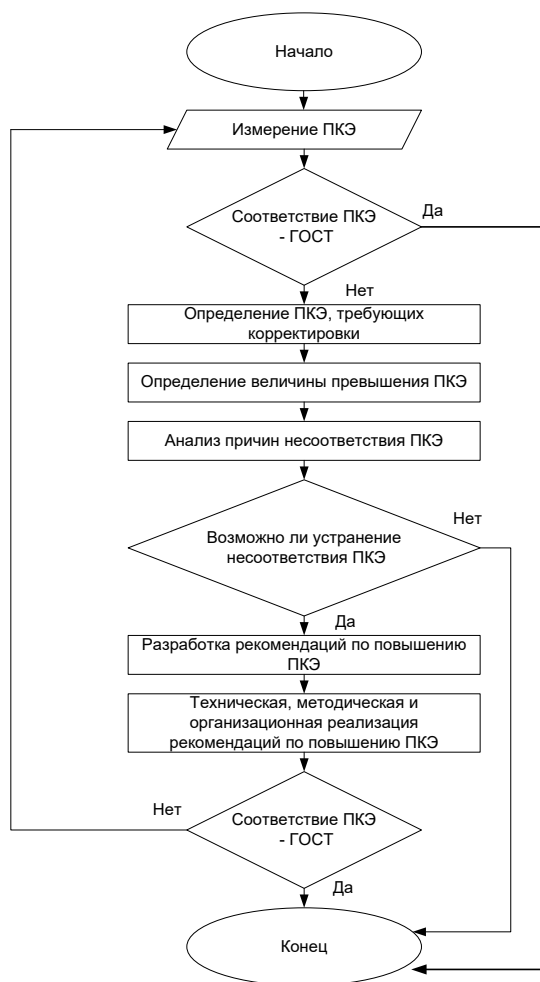


Рисунок 1 - Алгоритм экспериментальных исследований

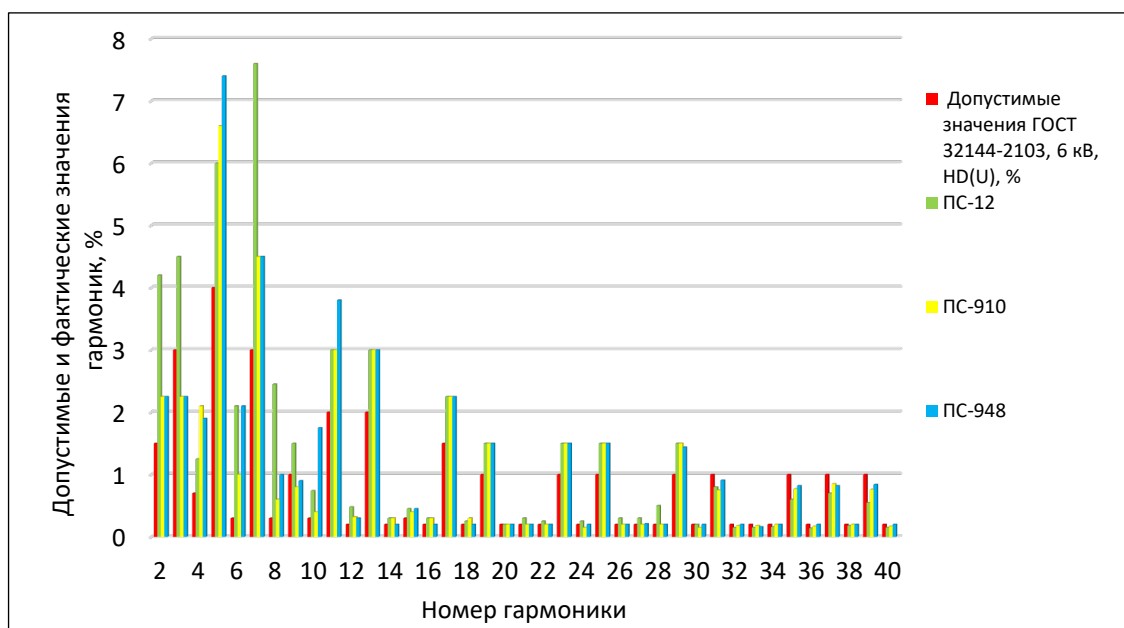


Рисунок 2 - Сравнительный анализ фактических и нормируемых значений по коэффициенту n-й гармонической составляющей напряжения на понизительных подстанциях угольной шахты

Этот же ГОСТ вводит ограничения для параметра (THD(U)), который не должен превышать значения 5% (уровень напряжения 6 кВ). Сравнительный анализ фактических и нормируемых значений по суммарному коэффициенту гармонической составляющей напряжения представлен в табл.1.

Таблица 1 – 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

На рис. 3 представлен сравнительный анализ фактических и нормируемых значений по коэффициенту n-й гармонической составляющей напряжения на высокопроизводительных выемочных участках угольных шахт «Полысаевская» и «им. С.М. Кирова» АО «СУЭК-Кузбасс».

Сравнительный анализ фактических и нормируемых значений по суммарному коэффициенту гармонической составляющей напряжения представлен в табл. 2.

Таблица 2 – 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»
THD (U),%	5,00	10,72	11,31

Установлено, что фактическое значение суммарного коэффициента гармонической составляющей напряжения превышает нормируемое значение на выемочном участке шахты «им С.М. Кирова» в 2,14 раза, на выемочном участке шахты «Полысаевская» в 2,26 раза. Исследованиями также установлено, что фактическое значение коэффициента мощности высокопроизводительных выемочных участков составляет 0,77, что требует его увеличения.

В третьей главе выполнены исследования, связанные с синтезом технических устройств, направленных на повышение качества электрической энергии в условиях высокопроизводительных угольных шахт. Проведенные экспериментальные исследования показали, что помимо демпфирования влияния высших гармоник необходимо повышение коэффициента мощности, поэтому для дальнейших исследований принят активный фильтр высших гармоник, а проведенный анализ позволил выявить наиболее приемлемый тип - активный фильтр высших гармоник с параллельным присоединением к сети и емкостным накопителем.

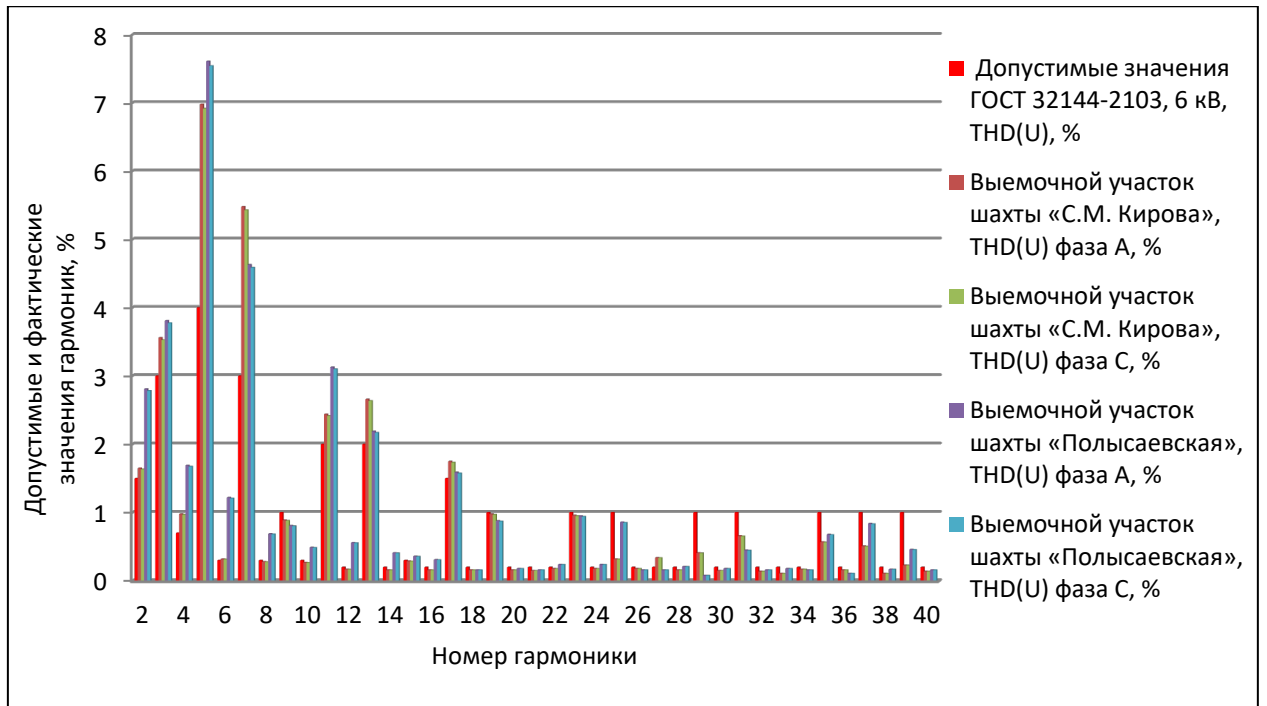


Рисунок 3 - Сравнительный анализ фактических и нормируемых значений по коэффициенту n-й гармонической составляющей напряжения в электрической сети выемочных участков угольных шахт

Методика моделирования активного фильтра высших гармоник, адаптированная для подземных электрических сетей угольных шахт, основана на прямом и обратном преобразованиях Кларк, т.е. преобразованиях из трехфазных координат токов и напряжений в двухмерную систему путем проекции соответствующих векторов на оси.

На рис. 4 представлен порядок формирования сигналов управления активного фильтра высших гармоник (основанного на прямом и обратном преобразованиях Кларк).

В основу определения величины емкости накопительного конденсатора активного фильтра высших гармоник положено выражение:

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

где: C – емкость накопительного конденсатора, мкФ; T – период сетевого напряжения; T_u – мощность искажений на конденсаторе, ВА; P_A – мощность потерь на IGBT, ВА; ΔU_{dc} – величина изменений выпрямленного напряжения, В; U_{dc} – величина выпрямленного напряжения, В.

В результате проведенного исследования величина ёмкости накопительного конденсатора активного фильтра высших гармоник, определяется как:

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

где: C – емкость накопительного конденсатора, мкФ; S – полная мощность, ВА; T – период сетевого напряжения; ΔU_{dc} – величина изменений выпрямленного напряжения, В; U_{dc} – величина выпрямленного напряжения, В; I – ток первой гармоники, А; I_n – уровень тока n – ной гармонической составляющей, В; 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.

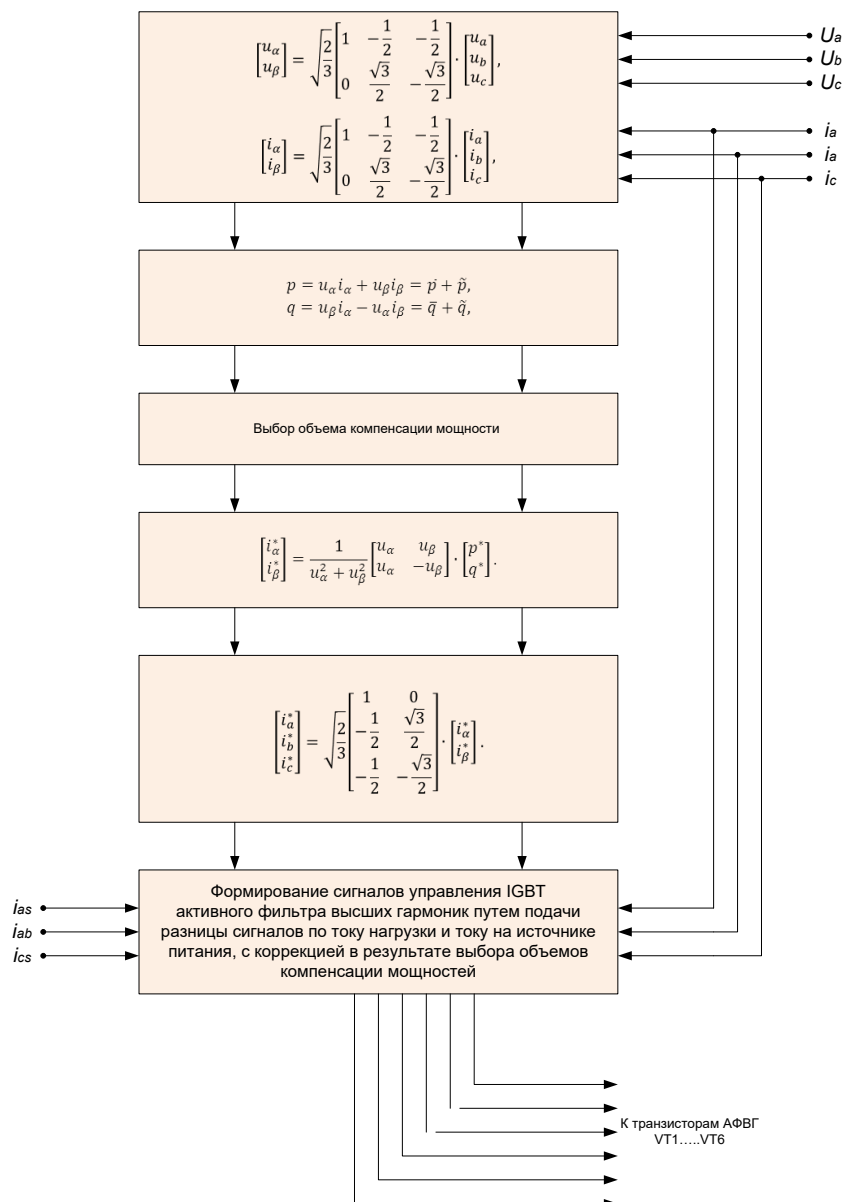


Рисунок 4 - Порядок формирования сигналов управления активного фильтра высших гармоник

Величина индуктивности входного дросселя активного фильтра высших гармоник:

$$L = \frac{\sqrt{3}U \cdot \Delta U}{2\pi f S},$$

где: L – индуктивность входного дросселя активного фильтра высших гармоник, Гн; U – напряжение, В; ΔU – потери напряжения на дросселе, В; f – частота питающей сети, Гц; S – полная мощность, ВА.

Результаты расчета накопительной емкости и индуктивности входного дросселя активного фильтра высших гармоник для всех уровней напряжения распределительных сетей высокопроизводительных угольных шахт представлены на рис. 5 и рис. 6, а в табл. 3 представлены их аналитические выражения.

В четвертой главе проведено исследование качества электрической энергии в подземных сетях угольных шахт с применением активных фильтров высших гармоник путем имитационного моделирования в программном продукте Matlab. Для этого была построена модель системы электроснабжения высокопроизводительного выемочного участка угольной шахты (рис. 7) с подсистемами нагрузка (LOAD) (рис. 8), и подсистемой управления активным фильтром высших гармоник (CLARKE) (рис. 9).

В состав данной подсистемы входят ряд элементов, которые выполняют определённые математические действия с сигналами по уровню напряжения с целью формирования сигналов управления активным выпрямителем, входящим в состав активного фильтра высших гармоник. Порядок формирования сигналов управления активным фильтром высших гармоник представлен на рис. 4.

Подсистема нагрузка (LOAD) включает подсистемы, имитирующие работу основного технологического оборудования: выемочного комбайна SL-300, дробилки FBL-10G Glinik, забойного конвейера FFC-9 Glinik, перегружателя FSL-9 Glinik.

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

- Нелинейная нагрузка в системе электроснабжения представлена в виде трехфазного неуправляемого шестипульсного выпрямителя;
- Источник напряжения, питающий высокопроизводительный выемочный участок, представлен в виде источника с внутренним сопротивлением - активным и индуктивным;
- Внутренним сопротивлением коммутационных аппаратов можно пренебречь.

Результаты моделирования системы электроснабжения выемочных участков с возможностью использования активного фильтра для демпфирования влияния высших гармоник представлен блоком имитационной модели Discrete Systems с директорией FFT Analysis Tool.

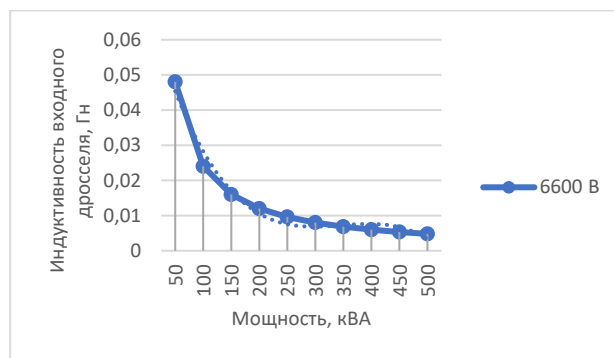
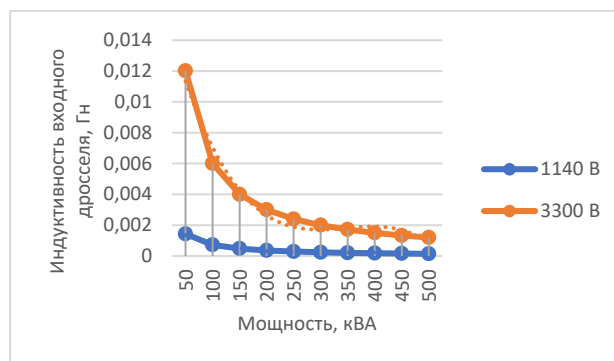
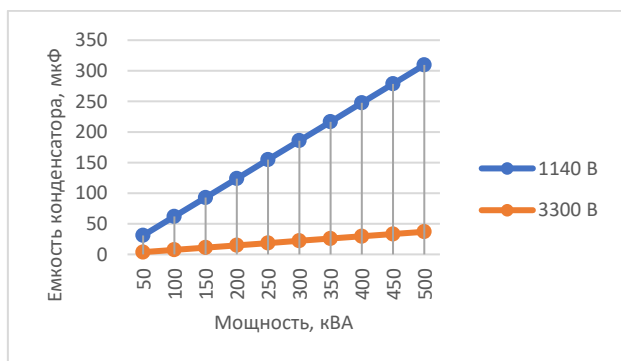
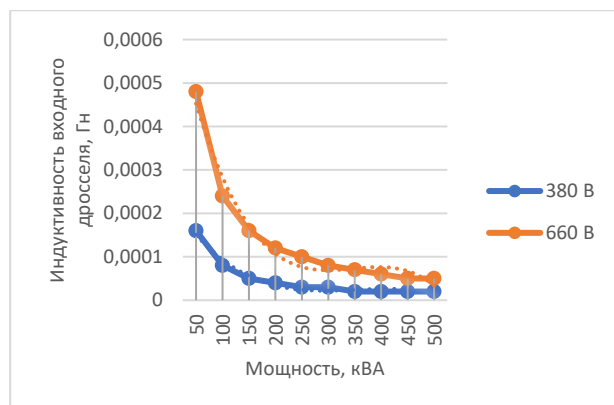
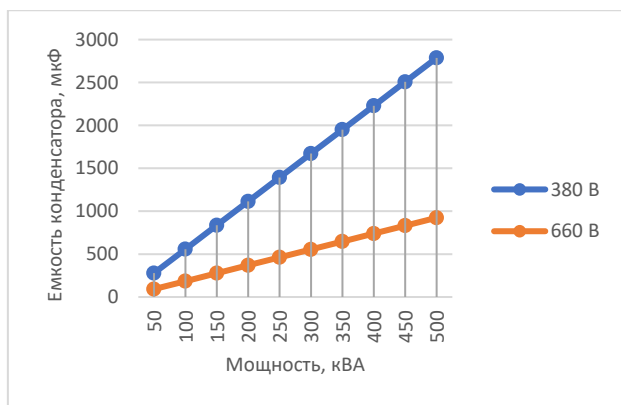


Рисунок 5 - Параметры накопительной емкости активного фильтра высших гармоник

Рисунок 6 - Параметры входного дросселя активного фильтра высших гармоник

Таблица 3 - Аналитические выражения для определения параметров активного фильтра высших гармоник

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

Обосновано, что активный фильтр высших гармоник (АФВГ) целесообразно установить на выходе энергопоезда, питающего забойный конвейер и перегружатель.

На рис. 10 и рис. 11 представлены гармонический состав сети и осциллограммы напряжения и тока с АФВГ и без него.

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

Доказана эффективность снижения суммарного коэффициента напряжений гармонических составляющих (THD (U)) за счет использования активного фильтра высших гармоник в системе электроснабжения выемочного участка (с 11,73% до 4,95%). При этом (THD (I)) возрос с 5,27 % до 7,50 %.

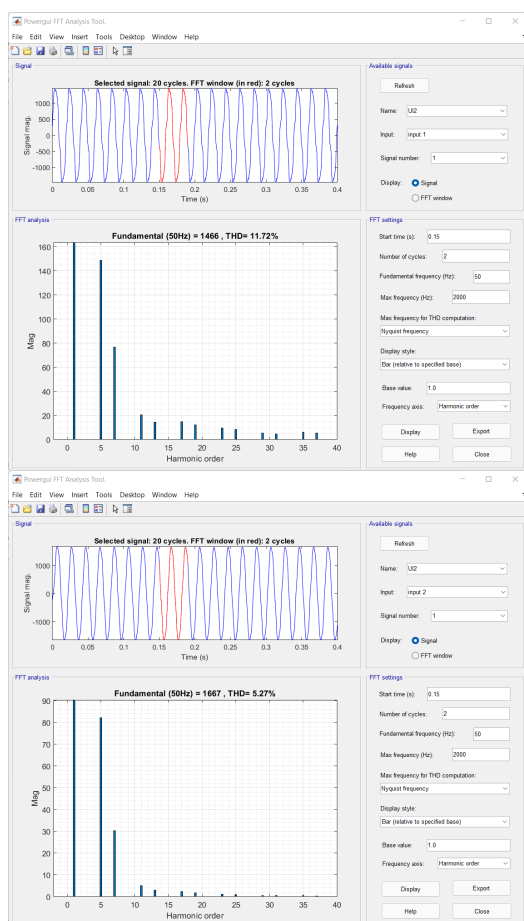


Рисунок 10 - Формы сигнала по напряжению и току, а также гармоническому составу до подключения фильтра высших гармоник

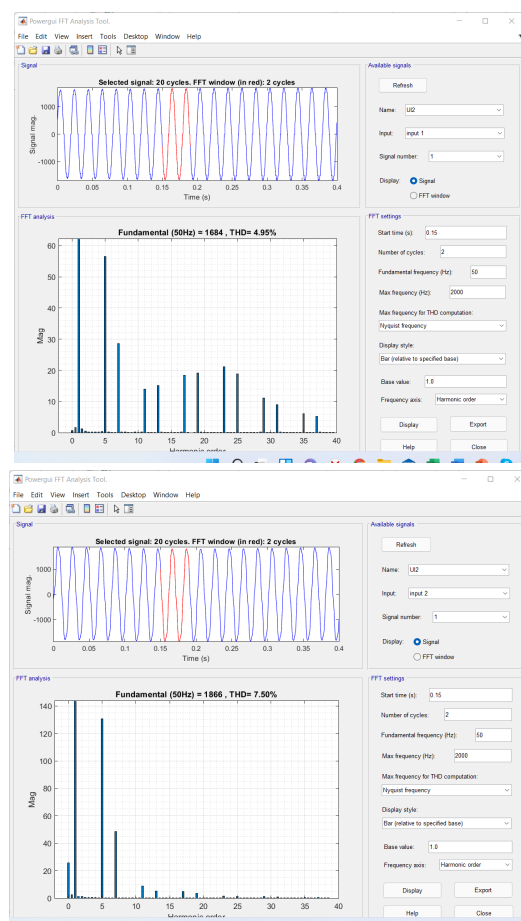


Рисунок 11 - Формы сигнала по напряжению и току, а также гармоническому составу после подключения фильтра высших гармоник

Проведено также исследование динамики коэффициента THD (U) с помощью имитационного моделирования при изменении параметров активного фильтра высших гармоник. В результате получены значения суммарного коэффициента напряжений гармонических составляющих THD(U) в зависимости от емкости накопительного конденсатора активного фильтра высших гармоник (Рис. 12) и индуктивности входного дросселя (Рис. 13).

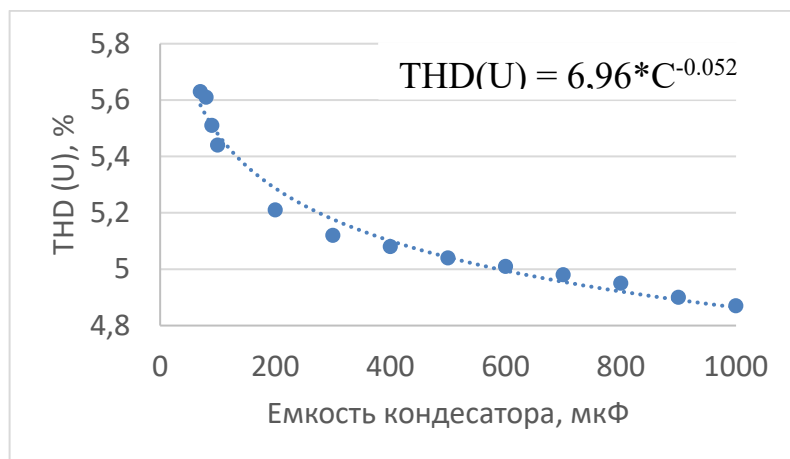


Рисунок 12 – Динамика коэффициента THD (U) в зависимости от емкости накопительного конденсатора АФВГ

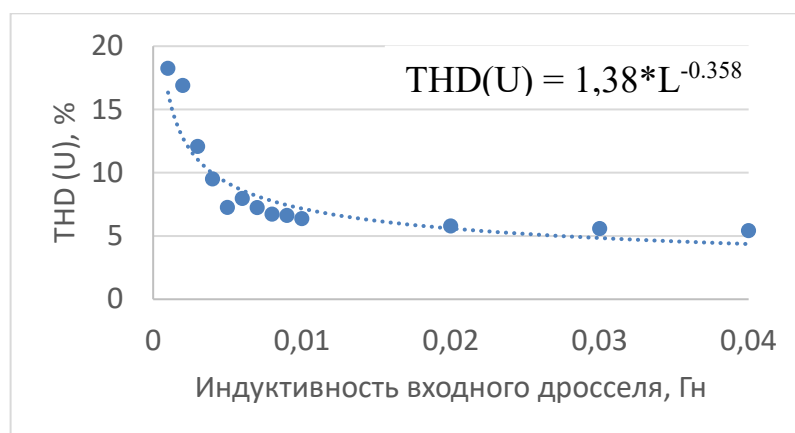


Рисунок 13 – Динамика коэффициента THD (U) в зависимости от индуктивности входного дросселя АФВГ

Пятая глава посвящена разработке структуры устройства автоматизированного мониторинга качества электрической энергии в подземных сетях угольных шахт, в том числе опасных по внезапным выбросам газа и пыли.

Высоковольтное устройство (рис.14) во взрывозащищенной оболочке 1 подключается между источником питания 2 и потребителем 3. Протекающий ток, величина которого преобразуется измерительными трансформаторами тока 4, 5, 6, поступает на анализатор качества электрической энергии 8.

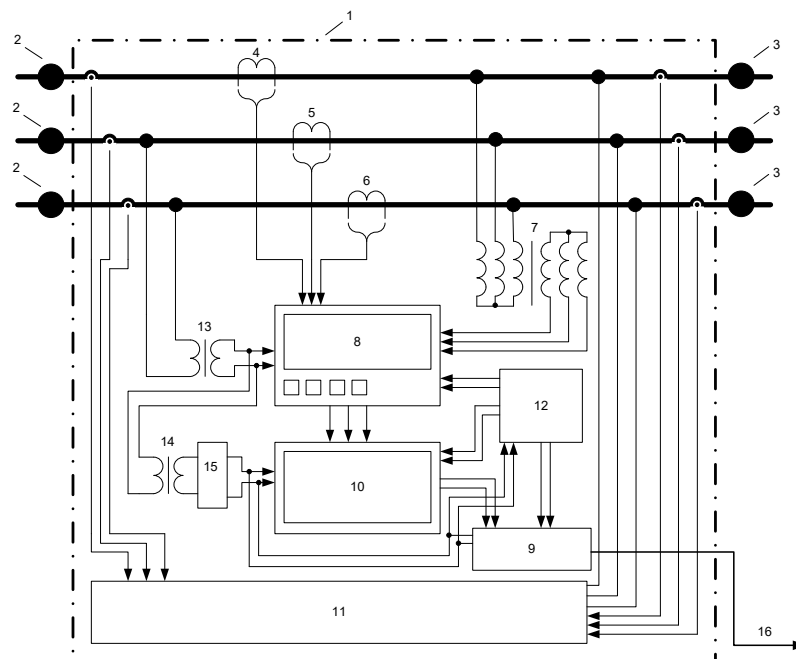


Рисунок 14 - Структурная схема высоковольтного устройства автоматизированного мониторинга качества электрической энергии в подземных сетях угольных шахт, в том числе опасных по внезапным выбросам газа и пыли

Для контроля качества напряжения на анализатор качества электрической энергии 8 поступает напряжение сети через измерительный трехфазный трансформатор напряжения 7. Питание анализатора качества электрической энергии 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. Кроме того, сигнал с анализатора качества электрической энергии 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.

В диссертационной работе дано обоснование местоположения фильтров высших гармоник в системе электроснабжения высокопроизводительной угольной шахты. Для этого построена имитационная модель системы электроснабжения с целью выявления гармонического состава и его влияния работу подземных потребителей (рис. 15).

Согласно проведенным исследованиям установлено, что основным источником высших гармоник в системе электроснабжения шахты является подъемная установка.

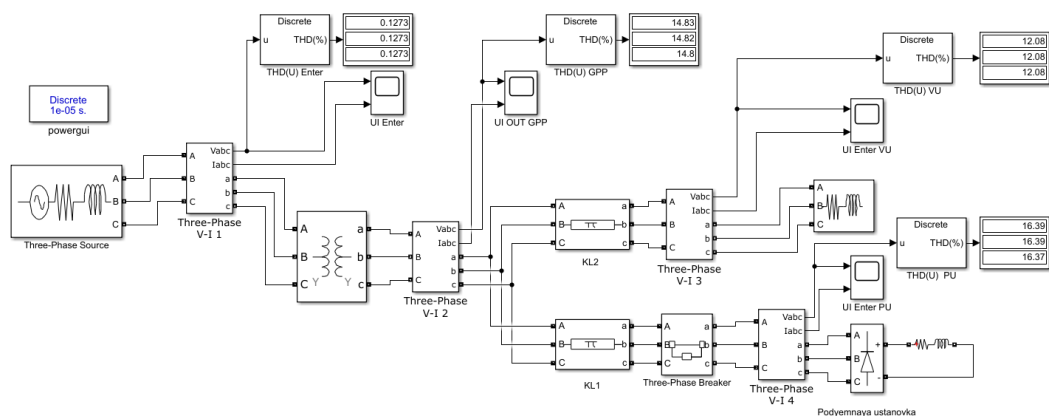


Рисунок 15 – Имитационная модель системы электроснабжения высокопроизводительной угольной шахты и результаты моделирования гармонического состава при подключении нелинейного потребителя (Подъемная установка)

При ее отключении от сети уровень суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжений (THD (U)) на ГПП снижается с 14,82% до 0,13%, а на входе выемочного участка - с 12,08 % до 0,13%. В соответствии с этим установка фильтра целесообразна на вводе, питающем подъемную установку.

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

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. Техничко-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.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Решетняк С.Н., **Решетняк М.Ю.** Актуальные аспекты повышения уровня энергоэффективности высокопроизводительных угольных шахт. Энергобезопасность и энергосбережение. №3 2017г. стр. 21-24.
2. 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.
3. 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.

4. 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.
5. Плащанский Л.А., **Решетняк М.Ю.** Актуальность оценки показателей качества электроэнергии в подземных электрических сетях угольных шахт. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – № 48 (специальный выпуск). М.: Издательство «Горная книга» 2018 г. с.313-321.
6. 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.
7. 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.
8. 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. p.97 – 102.
9. Плащанский Л.А., **Решетняк М.Ю.** Анализ электромеханических систем выемочных комбайнов угольных шахт высокой производительности. "Энергобезопасность и энергосбережение" №3 2019 г. с. 17-21.
10. 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). – № 7 2019г. с.207-213.
11. **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.
12. Плащанский Л.А., **Решетняк М.Ю.** Анализ гармонического состава в электрических сетях понизительных подстанций угольных шахт. Горный журнал №5 2020г. с. 63 – 67.
13. 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. DOI: 10.34831/EP.2021.75.65.004