



УДК 621.31

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВЫСШИХ ГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА УГОЛЬНОЙ ШАХТЫ

Решетняк С.Н.^{1,2}, Лебедев Г.М.³, Маметьев Л.Е.³, Черникова Т.М.³

¹ Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова РАН

² Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

³ Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева



Информация о статье

Поступила:

14 декабря 2024 г.

Рецензирование:

25 января 2025 г.

Принята к печати:

10 марта 2025 г.

Ключевые слова:

угольная шахта, система электроснабжения, электротехническая система, высшие гармонические составляющие, показатели качества электроэнергии, технологическое оборудование, фильтрокомпенсирующие устройства, технико-экономическая оценка, эффективность функционирования

Аннотация.

В публикации представлены результаты исследования технико-экономической оценки влияния высших гармонических составляющих на эффективность функционирования электротехнического комплекса угольной шахты. Проведенное исследование позволило обосновать необходимость исследования влияния высших гармонических составляющих в электротехнической системе угольной шахты высокой производительности. Это обусловлено значительным увеличением числа оборудования, использующего в системах электропривода преобразовательную нагрузку, которое генерирует высшие гармонические составляющие напряжения и тока, негативно влияющие на эффективность функционирования электротехнического комплекса угольной шахты. Превышение допустимого уровня высших гармонических составляющих приводит к нарушениям номинальных режимов работы основного технологического оборудования и, как результат, к снижению его производительности; к ложным срабатываниям защит, как следствие этого, к простоям участков и шахты в целом, что приводит к снижению добычи угля, повышению себестоимости его добычи. Кроме того, снижается срок службы электрооборудования, включая износ кабельных линий за счет нарушения изоляции, что приводит к повышению вероятности аварий. Для решения поставленной задачи предложено использование метода имитационного моделирования электротехнического комплекса угольной шахты с учетом декомпозиции системы электроснабжения с целью технико-экономической оценки влияния преобразовательной нагрузки на показатели качества электроэнергии. Была синтезирована имитационная модель системы электроснабжения угольной шахты с целью исследования генерации и демпфирования высших гармонических составляющих при использовании фильтрокомпенсирующих устройств. В результате проведенного исследования были получены заключения о возможности повышения эффективности функционирования электротехнической системы угольной шахты, при этом ожидаемый эффект, вызванный ограничением высших гармонических составляющих, составит порядка 1,5% от объемов потерь активной энергии.

Для цитирования: Решетняк С.Н., Лебедев Г.М., Маметьев Л.Е., Черникова Т.М. Технико-экономическая оценка влияния высших гармонических составляющих на эффективность функционирования электротехнического комплекса угольной // Техника и технология горного дела. – 2025. – № 1(28). – С. 4-21. – DOI: 10.26730/2618-7434-2025-1-4-21, EDN: MLUVQ



Введение

В современных условиях развития экономического потенциала Российской Федерации в области повышения эффективности добычи угля подземным способом действующими являются следующие нормативные акты: Федеральный закон «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 23.11.2009 № 261-ФЗ; Государственная программа РФ «Энергосбережение и повышение энергоэффективности на период до 2030 г.»; Государственная программа РФ «Энергоэффективность и развитие энергетики»; Государственная программа РФ «Развитие угольной промышленности до 2030 г.». Все эти нормативные документы, целью которых является создание правовых, экономических и организационных основ стимулирования энергосбережения и повышения энергетической эффективности, обосновывают необходимость внедрения комплексных технических и организационных мероприятий по повышению надежности и эффективности энергосистем, а также регламентируют повышение энергоэффективности угольных шахт, в том числе опасных по внезапным выбросам газа и пыли.

Следует отметить, что добыча угля подземным способом в настоящее время имеет значительные резервы по повышению ее интенсификации в России. Однако в настоящее время рынок энергетических ресурсов (в том числе рынок угля) нестабилен, это связано со значительным турбулентным режимом в мировой геополитике. Все же угледобывающая промышленность в России – динамически развивающаяся и весьма перспективная производственная отрасль, требующая новых технологических решений по снижению издержек, связанных с себестоимостью добычи [1-4]. Основной, энергетический ресурс, потребляемый при добыче угля подземным способом – электрическая энергия, расход которой в значительной степени влияет на ее себестоимость [5-7].

Вопросам эффективности функционирования электротехнических систем угольных шахт посвящены работы ученых: Абрамовича Б.Н., Волотковского С.А., Гладылина Л.В., Дзюбан В.С., Ляхомского А.В., Матвеева В.Н., Миновского Ю.П., Озерного М.И., Пивняка Г.Г., Плащанского Л.А., Пугачева Е.В., Разгильдеева Г.И., Серова В.И., Шайдурова А.С., Шклярского Я.Э., Щуцкого В.И. и других. 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.

Основными мероприятиями по повышению эффективности функционирования промышленных предприятий, в том числе угольных шахт, являются модернизация основного технологического оборудования, корректировка режимов работы оборудования, разработка новых технологических решений и т. д. [8-9]. Однако все представленные мероприятия, как правило, осуществляются с помощью технологического оборудования с использованием регулируемых систем управления на основе преобразовательных устройств, работа которых вносит значительные искажения в питающую сеть посредством генерации высших гармонических составляющих напряжения и тока, что приводит: к нарушению номинальных режимов работы основного технологического оборудования, как следствие этого, к снижению его производительности; ложным срабатываниям защит, как следствие этого, простоям оборудования и шахты в целом (снижению добычи угля, повышению себестоимости его добычи); сокращению сроков службы электрооборудования, включая кабельные линии за счет нарушения изоляции и, как следствие, к повышению вероятности аварий, что является недопустимым, особенно в условиях угольных шахт, опасных по внезапным выбросам газа и пыли [9, 10]. Следует отметить, что в ближайшее время доля преобразовательной нагрузки (систем управления электроприводами с преобразовательными устройствами (выпрямителями и преобразователями частоты) в условиях угольных шахт будет только возрастать. Это обусловлено модернизацией технологического оборудования за счет современных систем электропривода, способных на работу в различных режимах, в том числе с регулированием скорости вращения с удаленным управлением, автоматизированным управлением оборудованием, а также возможностью создания систем с управлением искусственным



интеллектом [11, 12]. Это в значительной степени позволит повысить уровень безопасности ведения подземных горных работ за счет вывода (минимизации) персонала выемочных и проходческих участков из потенциально опасной зоны. Однако в этом случае возникает необходимость исследования влияния высших гармонических составляющих (ВГС) на эффективность функционирования технологического оборудования угольных шахт, в том числе опасных по внезапным выбросам газа и пыли.

По проблеме влияния ВГС электрической энергии на эффективность работы оборудования выполнено значительное число исследований для условий общепромышленных предприятий [13-17]. Признанными научными авторитетами в области исследования гармонического состава сети являются профессора Абрамович Б.Н., Жежеленко И.В., Железко Ю.С. Именно в их научных трудах сформулированы основные положения теории исследования гармонического состава в электрических сетях [18-20]. В частности, в их трудах 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. Вместе с тем исследований режимов генерирования и снижения негативного влияния высших гармонических составляющих в электротехнических системах угольных шахт в аспекте разработанности проблемы недостаточно. При всей своей общности процессов технического и экономического характера система электроснабжения угольной шахты обладает специфическими качествами, связанными с высокой пространственно-временной динамичностью, близостью электрооборудования к технологическим зонам, значительной интенсивностью использования оборудования, неоднородностью, неопределенностью производственных процессов, сложностью и интенсивным воздействием внешней окружающей среды.

Достоверно известно, что высшие гармонические составляющие напряжения и тока оказывают негативное влияние на электротехнические системы. Уровень их воздействия на электротехническую систему (ЭТС), в том числе на ЭТС угольной шахты, зависит от ряда факторов, основным из которых является мощность преобразовательной нагрузки и режим ее работы, являющаяся источником высших гармонических составляющих. В настоящий момент существует ряд устройств, способных демпфировать влияние высших гармонических составляющих напряжения и тока, таких как пассивные фильтры ВГС, активные фильтры ВГС, различные виды компенсаторов (СТАТКОМ, СТК, ДКИН, УК). Данные устройства позволяют повысить параметры качества электрической энергии в электротехнической системе. Однако их использование в электротехнической системе угольной шахты весьма затруднительно, так как система электроснабжения угольной шахты, особенно опасной по внезапным выбросам газа и пыли, в значительной степени отличается от электротехнических систем промышленных предприятий. Использование ряда теорий и методов анализа высших гармонических составляющих напряжения и тока также весьма затруднительно ввиду отсутствия нормативных документов и методик проведения экспериментальных исследований в системах подземного электроснабжения. Все проведенные исследования параметров качества электрической энергии выполнены лишь на технологическом оборудовании поверхностного комплекса угольной шахты, что в условиях интенсификации добычи угля подземным способом является недостаточным. Интенсификация добычи угля обусловлена увеличением технологического оборудования с использованием регулируемых систем управления электроприводами на основе преобразовательных устройств, вносит значительные искажения в питающую сеть посредством генерации высших гармонических составляющих напряжения и тока, при этом отсутствуют исследования, связанные с влиянием генерации высших гармонических составляющих напряжения и тока потребителей поверхности угольной шахты с преобразовательной нагрузкой на подземные потребители, с учетом декомпозиции электротехнической системы.

Следует отметить, что использование фильтров высших гармонических составляющих в системе участкового электроснабжения угольной шахты, в том числе опасной по внезапным выбросам газа и пыли, невозможно из-за отсутствия технических решений по обеспечению качества электроэнергии, способных безопасно работать в условиях подземных горных



выработок. В связи с этим возникает научная проблема ограничения влияния высших гармонических составляющих как напряжения, так и тока на функционирование технологического оборудования угольных шахт, расположенного как на поверхности предприятия, так и в подземных горных выработках. Ввиду этого технико-экономическая оценка влияния высших гармонических составляющих на эффективность функционирования электротехнического комплекса угольной шахты является актуальной научной задачей.

Методы

Для исследования влияния генерации ВГС потребителей с преобразовательной нагрузкой поверхности угольной шахты было предложено декомпозировать систему электроснабжения на определенные участки, гальванически не связанные между собой. Согласно предложенному решению в системе электроснабжения имеется три уровня:

- первый уровень – система внешнего электроснабжения, включающая коммутационные аппараты и первичные обмотки силовых трансформаторов ГПП (главная понизительная подстанция);
- второй уровень – вторичные обмотки силовых трансформаторов, кабельные и воздушные линии (при их наличии) от вторичных обмоток силовых трансформаторов до первичных обмоток энергопоездов высокопроизводительных участков угольных шахт, первичные обмотки трансформаторных подстанций энергопоездов высокопроизводительных участков угольных шахт, потребители поверхности угольной шахты с преобразовательной нагрузкой, кабельные и воздушные линии (при их наличии) от потребителей преобразовательной нагрузки поверхности до шин ГПП, коммутационные аппараты, входящие в соответствующую область;
- третий уровень – вторичные обмотки трансформаторных подстанций энергопоездов высокопроизводительных участков угольных шахт, кабельные линии в пределах высокопроизводительных участков, питающих преобразовательную нагрузку, потребители высокопроизводительных участков угольной шахты с преобразовательной нагрузкой, коммутационные аппараты, входящие в соответствующую область.

В работе предложен алгоритм расчета параметров системы электроснабжения угольной шахты высокой производительности с учетом декомпозиции, а также учетом влияния высших гармонических составляющих (Рис. 1). Согласно алгоритму расчета параметров системы электроснабжения угольной шахты высокой производительности при учете влияния высших гармонических составляющих выполняется в следующей последовательности:

1. проводится определение основных параметров угольной шахты (производительность, глубина ведения горных работ и т. д.);
2. проводится определение набора технологического оборудования угольной шахты с целью эффективной разработки месторождения угля подземным способом;
3. проводится определение мощностей технологического оборудования угольной шахты;
4. определяется конфигурация системы электроснабжения;
5. с учетом декомпозиции системы электроснабжения проводится предварительный выбор системы электроснабжения поверхностного комплекса угольной шахты, а также расчет ее параметров и выбор оборудования;
6. проводится проверка системы электроснабжения поверхностного комплекса угольной шахты по следующим критериям: проверка кабельной сети по потере напряжения; проверка кабельной сети по термической стойкости; проверка кабельной сети по экономической плотности тока; проверка сопротивления изоляции и емкости сети; проверка воздушной сети по потере напряжения; проверка устойчивости работы системы электроснабжения угольной шахты при пуске наибольшего по мощности потребителя; в случае соответствия всех критериев рационализации системы электроснабжения – следующий этап, в случае несоответствия – возврат в процесс предварительного выбора системы электроснабжения поверхностного комплекса угольной шахты, а также выполнение новых расчетов параметров и выбора аппаратуры;



7. согласно выбранному технологическому оборудованию поверхностного комплекса угольной шахты, определяется ожидаемый уровень высших гармонических составляющих напряжения и тока;
8. с учетом декомпозиции системы электроснабжения проводится предварительный выбор системы электроснабжения подземной части угольной шахты, а также расчет ее параметров и выбор оборудования;
9. проводится проверка системы электроснабжения подземной части угольной шахты по следующим критериям: проверка кабельной сети по потере напряжения; проверка кабельной сети по термической стойкости; проверка кабельной сети по экономической плотности тока; проверка сопротивления изоляции и емкости сети; проверка устойчивости работы системы электроснабжения угольной шахты при пуске наибольшего по мощности потребителя;
10. в случае соответствия всех критериев рационализации системы электроснабжения – следующий этап, в случае несоответствия – возврат в процесс предварительного выбора системы электроснабжения подземной части угольной шахты, а также выполнение новых расчетов параметров и выбора аппаратуры;
11. согласно выбранному технологическому оборудованию подземной части угольной шахты, определяется ожидаемый уровень высших гармонических составляющих напряжения и тока;
12. выполняется создание имитационной модели системы электроснабжения угольной шахты (включающей систему электроснабжения поверхности и подземную часть);
13. проводится анализ и верификация результатов имитационного моделирования по ранее проведенным расчетам параметров системы электроснабжения, включая оценку ожидаемых показателей уровня качества электрической энергии с фактическими значениями;
14. проводится определение типа и точек установки фильтрокомпенсирующих устройств, как в системе электроснабжения поверхностного комплекса угольной шахты, так и в ее подземной части;
15. согласно предложенным методикам, определяются параметры фильтрокомпенсирующих устройств, как в системе электроснабжения поверхностного комплекса угольной шахты, так и ее подземной части;
16. выполняется создание имитационной модели системы электроснабжения угольной шахты (включающей систему электроснабжения поверхности и подземную часть), в состав которой включены фильтрокомпенсирующие устройства;
17. проводится анализ результатов имитационного моделирования на соответствие нормативным значениям параметров качества электрической энергии;
18. в случае соответствия параметров качества электрической энергии – завершение, в случае несоответствия – возврат на этап определения типа и точек установки фильтрокомпенсирующих устройств, как в системе электроснабжения поверхностного комплекса угольной шахты, так и в ее подземной части.

Основные характеристики схем электроснабжения высокопроизводительных угольных шахт обусловлены рядом горно-геологических и технологических факторов: глубина ведения горных работ; схема вскрытия шахтного поля; способ подготовки шахтного поля; система отработки угольного пласта [1]. Кроме того, при разработке схем электроснабжения угольных шахт необходимо учитывать требования обеспечения максимальной безопасности при применении электрической энергии в специфических условиях горных выработок угольных шахт, в том числе угольных шахт, опасных по внезапным выбросам газа и пыли. Все представленные факторы, а также факторы обеспечения бесперебойности и надежности схем электроснабжения, обоснованные расчеты потерь электрической энергии при транспортировке до конечных потребителей определяют экономические показатели конкретной схемы электроснабжения конкретной шахты.

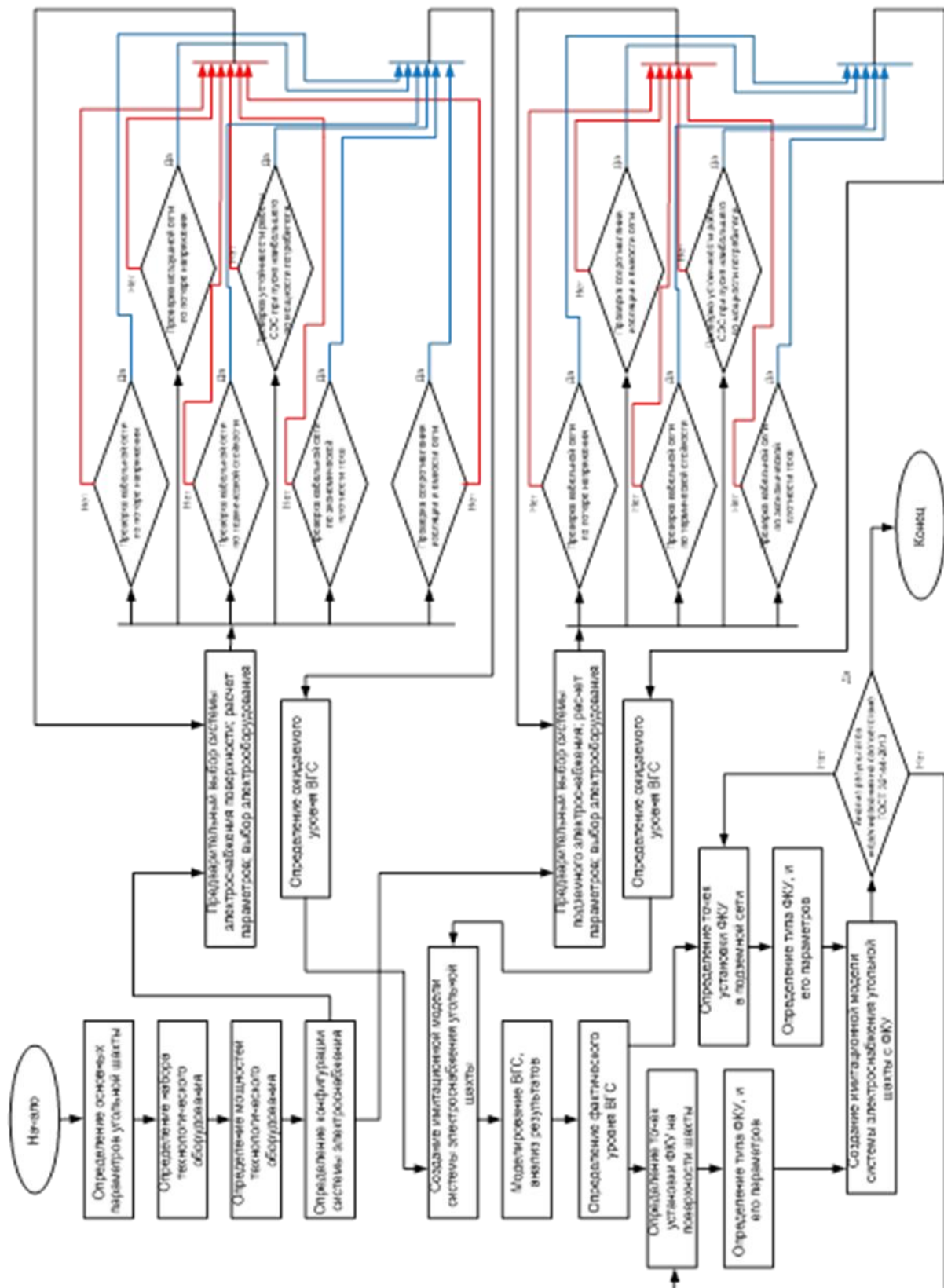


Рисунок 1 – Алгоритм расчета параметров системы электроснабжения угольной шахты высокой производительности с учетом декомпозиции и при влиянии высших гармонических составляющих
Figure 1 – Algorithm for calculating the parameters of the power supply system of a high-performance coal mine, taking into account decomposition, and with the influence of higher harmonic components



В условиях угольных шахт высокой производительности возможна классификация основных технологических участков по виду нагрузки. Проведенный анализ технологического оборудования ряда высокопроизводительных угольных шахт, расположенных в Кузнецком угольном бассейне, Донецком угольном бассейне, Воркутинском угольном бассейне позволил определить тип нагрузки отдельных ее участков, согласно которому основными источниками преобразовательной нагрузки на поверхности являются шахтные подъемные установки с долей мощности, достигающей 20%. Основными источниками преобразовательной нагрузки в подземных условиях угольных шахт являются высокопроизводительные выемочные участки с долей мощности порядка 20% в общем балансе. Поэтому именно этим технологическим установкам и производственным участкам следует уделить особое внимание, так как они являются основными элементами с преобразовательной нагрузкой и в значительной степени влияют на показатели качества электрической энергии в условиях угольных шахт, так как генерируют высшие гармонические составляющие в питающую сеть и оказывают значительное негативное влияние на электротехническую систему угольной шахты.

Анализ ряда схем электроснабжения угольных шахт позволил определить наиболее распространенную из них. В частности, на угольных шахтах высокой производительности Кемеровской области – Кузбасса достаточно широкое распространение получили совмещенные схемы электроснабжения. На ГПП угольной шахты поступает напряжение от двух независимых источников напряжением 110/35 кВ, которое понижается до уровня 10/6 кВ и поступает на шины ГПП. От шин ГПП происходит транспортировка напряжения на потребители поверхности по воздушным или кабельным линиям, происходит транспортировка напряжения по кабельным линиям в стволе шахты до ЦПП и далее кабельными линиями до конечных потребителей. Кроме того, на флангах шахтного поля имеется ряд скважин, через которые осуществляется транспортировка напряжения по кабельным линиям к подземным потребителям. Следует отметить, что транспортировка напряжения до фланговых скважин осуществляется, как правило, воздушными линиями.

В настоящее время одним из методов оценки влияния высших гармонических составляющих в условиях электротехнических систем угольных шахт высокой производительности, в том числе опасных по внезапным выбросам газа и пыли, является имитационное моделирование. В качестве средства моделирования принят программный продукт Matlab. Структура электроснабжения угольной шахты для имитационного моделирования для исследования влияния высших гармоник на сеть представлена на Рис. 2.

Принятые сокращения в структуре: И 1 – Источник высокого напряжения угольной шахты 1; И 2 – Источник высокого напряжения угольной шахты 2; ОНППК 1 – Обособленная нагрузка потребителей поверхностного комплекса, фидер 1; ОНППК 2 – Обособленная нагрузка потребителей поверхностного комплекса, фидер 2; ГПП – Главная понизительная подстанция; ЦПП – Центральная подземная подстанция; ГВУ 1 – Главная вентиляционная установка, № 1; ГВУ 2 – Главная вентиляционная установка, № 2; ШПУ 1 – Шахтная подъемная установка, № 1 (скиповая); ШПУ 2 – Шахтная подъемная установка, № 2 (клетевая); ВУ – Выемочный участок; УКТ – Участок конвейерного транспорта; ПУ 1 – Проходческий участок 1; ПУ 2 – Проходческий участок 2; УВ – Участок водоотлива; ОНПОД 1 – Обособленная нагрузка потребителей околоствольного двора, ввод 1; ОНПОД 2 – Обособленная нагрузка потребителей околоствольного двора, ввод 2; ФКУ 1 – Фильтрокомпенсирующее устройство на 1 секции шин 6 кВ; ФКУ 2 – Фильтрокомпенсирующее устройство на 2 секции шин 6 кВ; АРД 1 – Антирезонансный дроссель на 1 секции шин; АРД 2 – Антирезонансный дроссель на 2 секции шин; ВВ – высоковольтный выключатель, СВ – секционный выключатель.

Следует отметить, что исследования по технико-экономической оценке влияния высших гармонических составляющих на эффективность функционирования электротехнического комплекса угольной шахты выполнены для второго уровня принципа декомпозиции (наиболее распространенного уровня напряжения на угольной шахте 6 кВ). Предложенная структура легла в основу построения имитационной модели систем электроснабжения угольной шахты для оценки влияния и демпфирования высших гармоник. Моделирование СЭС угольной шахты выполнено с директории Simulink, SimScope (программный продукт Matlab).

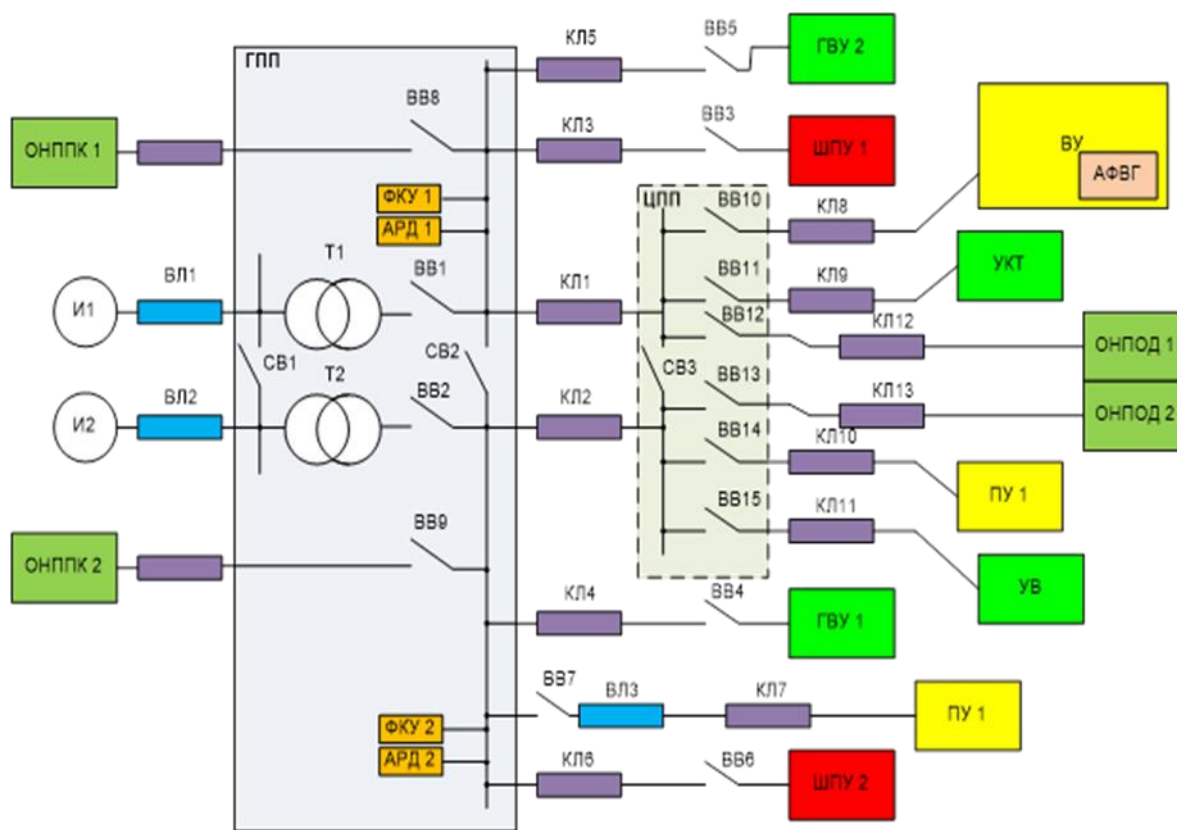


Рисунок 2 – Структура системы электроснабжения угольной шахты
Figure 2 – Structure of the power supply system of a coal mine

На Рис. 3 представлена имитационная модель системы электроснабжения угольной шахты для оценки влияния ВГС на эффективность функционирования технологического оборудования, расположенного на поверхности и в подземных горных выработках.

Имитационная модель состоит из двух источников напряжения, высоковольтной линии электропередачи с распределенными параметрами по активному и реактивному сопротивлению, измерительных блоков и осциллографов, позволяющих получить осциллограммы токов и напряжений, а также определить уровни параметра суммарных коэффициентов K_U и K_I .

Кроме того, в модели имеется ряд высоковольтных коммутационных аппаратов, которые имитируют работу высоковольтных выключателей и секционных высоковольтных выключателей. Также присутствует ряд нагрузок, в частности, имеется линейная нагрузка, которая имитирует технологическое оборудование без преобразовательных устройств либо с преобразовательными устройствами незначительной мощности, влияние которых на питающую сеть незначительно и им можно пренебречь, элементы с преобразовательной нагрузкой, выполненные в виде подсистем, которые имитируют оборудование отдельных технологических единиц: главная вентиляционная установка, шахтная подъемная установка, выемочный участок, участок конвейерного транспорта, проходческий участок 1, проходческий участок 2, участок водоотлива. Подсистема имитационной модели выемочного участка угольной шахты состоит из кабельных линий с распределенными параметрами, высоковольтных коммутационных аппаратов (выключателей), ряда понизительных подстанций, три из которых входят в состав энергопоезда и одна из которых в его состав не входит и служит для питания маслостанции, входящей в состав механизированной крепи выемочного участка. Кроме того, в ее состав входит ряд моделей технологического оборудования, которые выполнены в виде подсистем и нагрузок.

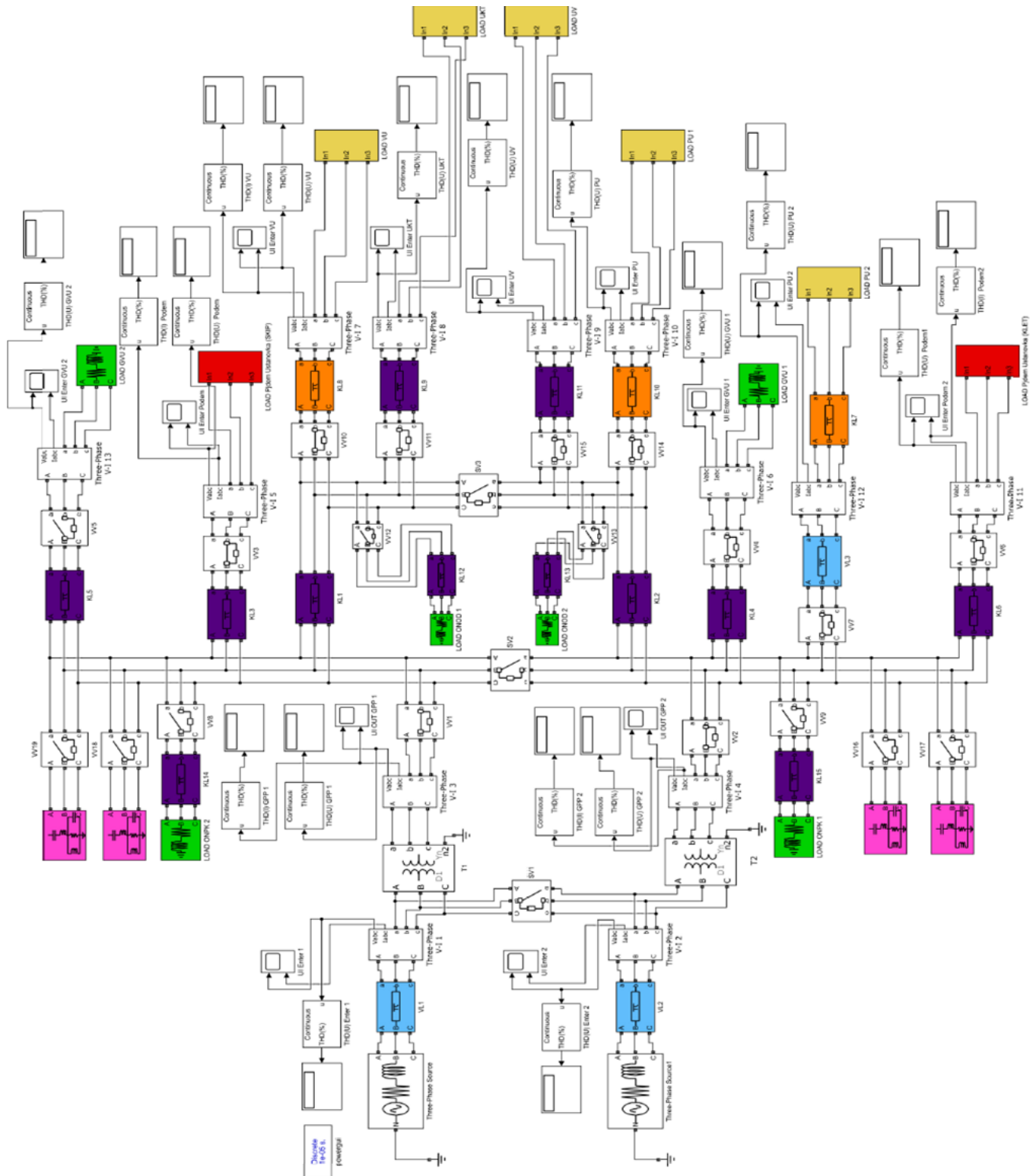


Рисунок 3 – Имитационная модель системы электроснабжения угольной шахты
 Figure 3 – Simulation model of the power supply system of a coal mine

К данным элементам относятся подсистемы выемочного комбайна, забойного конвейера, дробилки, перегружателя, маслостанции крепи, станции орошения и прочего низковольтного оборудования. Подсистема имитационной модели проходческого участка угольной шахты



представлена в виде кабельных линий с распределенными параметрами высоковольтных коммутационных аппаратов (выключателей), ряда понизительных подстанций, а также ряда нагрузок линейных и преобразовательных, которые выполнены в виде подсистем, в частности, проходческого комбайна, вентиляторов местного проветривания, осланцевателя, ленточных конвейеров, перегружателя. Подсистема имитационной модели участка конвейерного транспорта угольной шахты представлена в виде кабельных линий с распределенными параметрами, высоковольтных коммутационных аппаратов (выключателей), ряда понизительных подстанций. В качестве приводных двигателей выступает линейная нагрузка, так как проведенное обследование ряда шахт показало, что двигатели не имеют преобразовательных устройств и запускаются прямым пуском. Подсистема имитационной модели участка водоотлива угольной шахты представлена в виде кабельных линий с распределенными параметрами, высоковольтных коммутационных аппаратов (выключателей), ряда понизительных подстанций и также в своем составе не имеет преобразовательных устройств. Подсистема имитационной модели участка главной вентиляторной установки угольной шахты представлена в виде линейной нагрузки. Подсистема, имитирующая основной источник высших гармоник потребителей поверхности угольной шахты – шахтная подъемная установка – представлена в виде обобщенной модели электротехнической системы преобразовательной нагрузки (6-пульсная схема). Следует отметить, что самые распространенные системы управления электроприводом шахтных подъемных установок УВ-ДПТ (Управляемый выпрямитель – Двигатель постоянного тока) и ПЧ-АД (Преобразователь частоты – асинхронный двигатель) имеют в своем составе 6-пульсный преобразователь и генерируют основные высшие гармоники одного состава 5 и 7, а также 11 и 13.

Результаты исследования

В результате имитационного моделирования системы электроснабжения угольной шахты получен ряд осциллограмм, которые позволяют оценить уровни токов и напряжений в контрольных точках системы электроснабжения до и после подключения пассивных ФКУ на секции шин. В частности, на Рис. 4 представлены осциллограммы напряжения и тока на шинах ГПП (секция 1) до подключения ФКУ, на Рис. 5 представлены осциллограммы напряжения и тока на шинах ГПП (секция 1) после подключения ФКУ. Кроме того, обработка результатов моделирования позволила построить диаграмму (Рис. 6) по определению динамики значения суммарного значения коэффициента гармонических искажений по напряжению K_U до и после включения ФКУ. В частности, эффективность снижения K_U на 1 секции шин ГПП (6 кВ) составила 87,3% со значения 10,82% до подключения ФКУ к значению 1,37% после подключения ФКУ. На секции 2 эффективность снижения K_U на 2 секции шин ГПП (6 кВ) составила 87,3% со значения 9,39% до подключения ФКУ к значению 1,19% после подключения ФКУ, что подтвердило высокую эффективность использования пассивного ФКУ с целью ограничения влияния высших гармонических составляющих в системе электроснабжения.

Действительные значения электротехнических параметров системы электроснабжения угольной шахты до и после подключения ФКУ представлены в Таблице 1. В Таблице 2 представлены справочные данные по значениям коэффициентов спроса и коэффициентам мощности для технологических процессов в условиях угольных шахт.

Обсуждение

Согласно проведенным расчетам были определены значения полной мощности отдельных основных элементов технологических процессов и технологических установок и точек контроля системы электроснабжения до и после подключения ФКУ. Определена разница полной мощности ΔS отдельных основных элементов технологических процессов и технологических установок до и после подключения ФКУ.

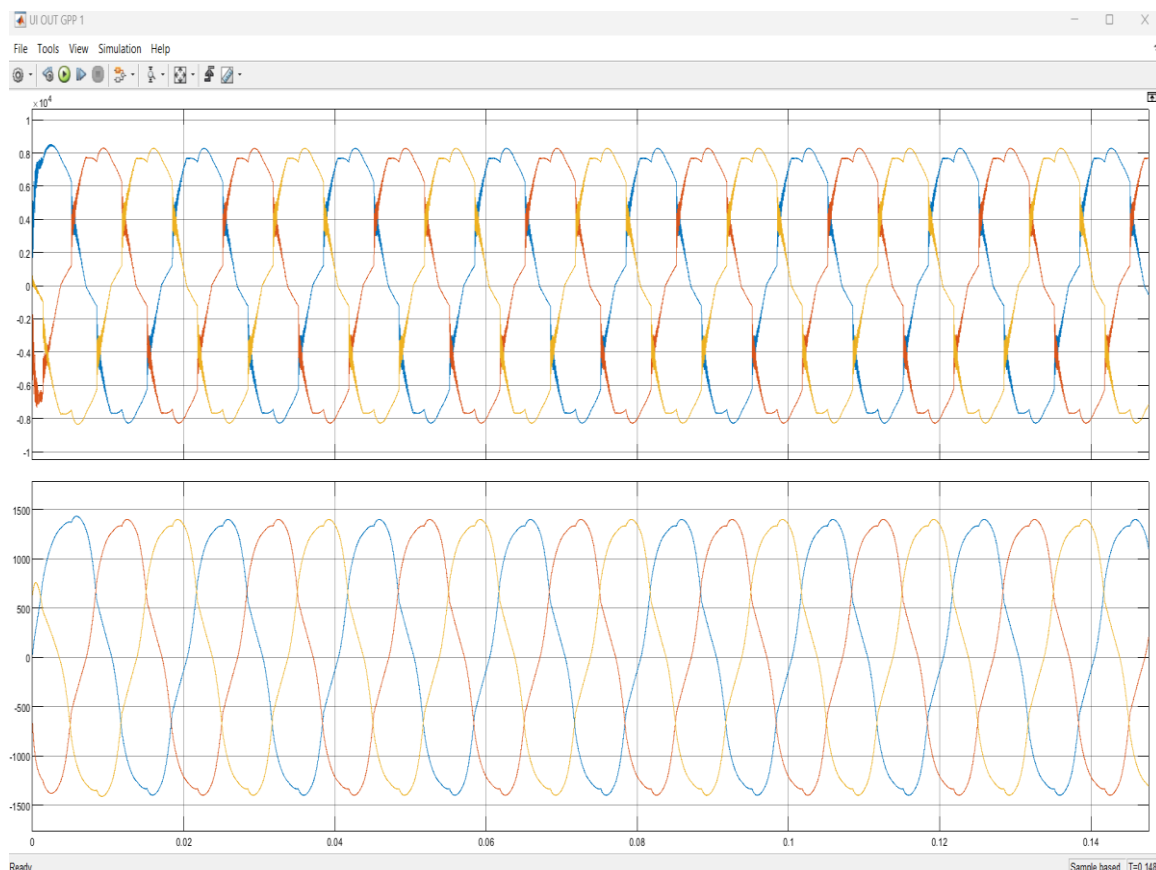


Рисунок 4 – Осциллограммы напряжения и тока на шинах ГПП (секция 1) до подключения ФКУ

Figure 4 – Voltage and current waveforms on the GPP buses (section 1) before connecting the FCD

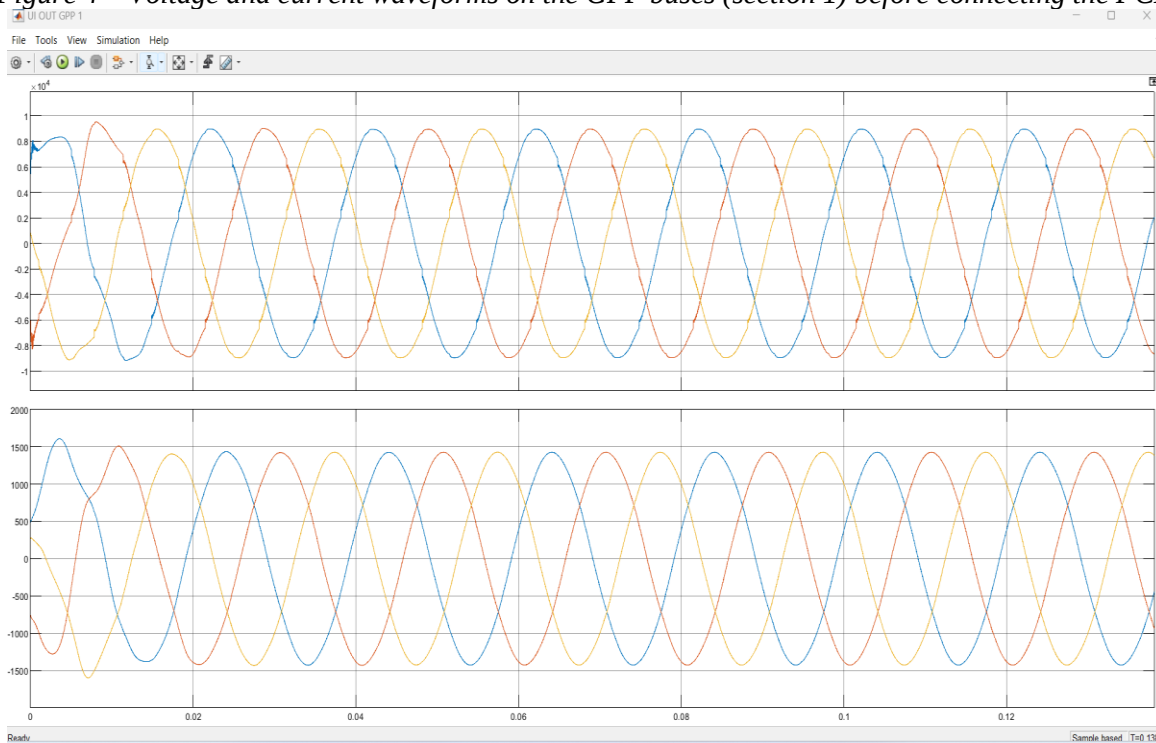


Рисунок 5 – Осциллограммы напряжения и тока на шинах ГПП (секция 1) после подключения ФКУ

Figure 5 – Voltage and current waveforms on the GPP buses (section 1) after connecting the FCD

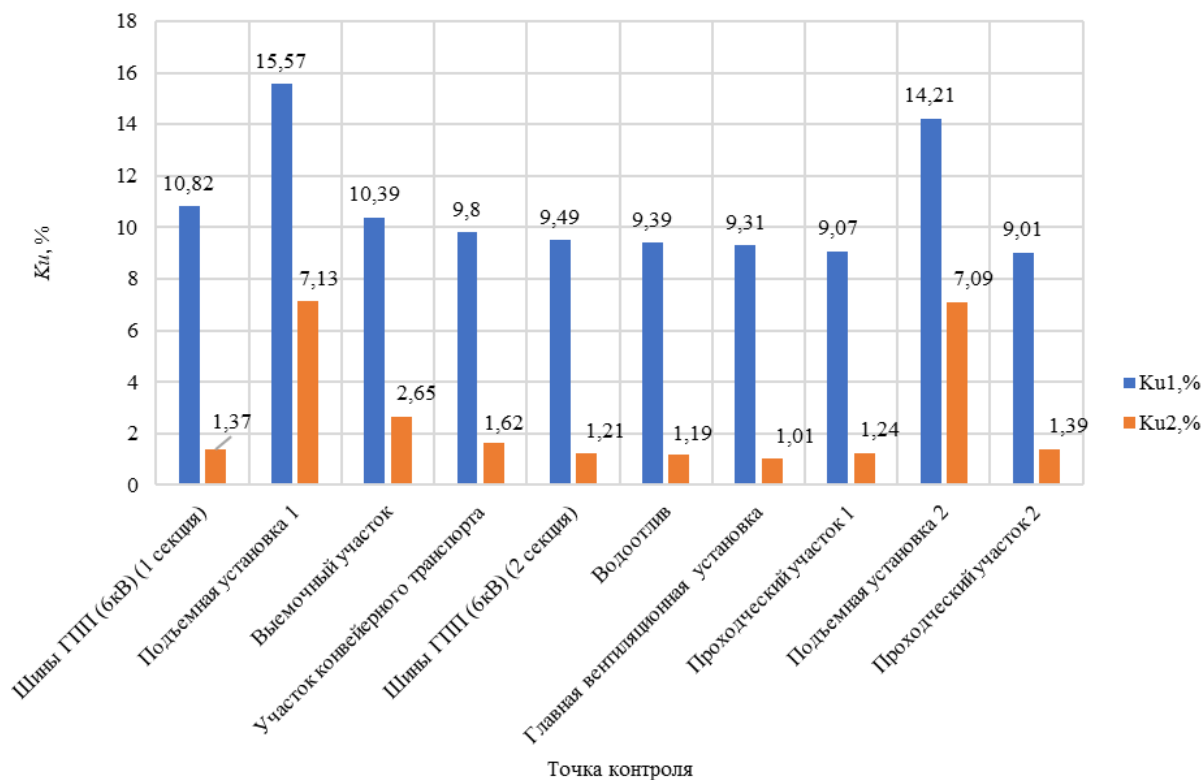


Рисунок 6 – Динамика значения K_u до и после включения ФКУ
 Figure 6 – Dynamics of the K_u value before and after switching on the FCD

Таблица 1 – Сводная таблица параметров действительных значений электротехнических параметров системы электроснабжения угольной шахты до и после подключения ФКУ
 Table 1 – Summary table of the parameters of the actual values of the electrical parameters of the coal mine power supply system before and after the connection of the FCD

Точка контроля	до вкл. ФКУ на ГПП			после вкл. ФКУ на ГПП			ΔS , кВА
	U1, кВ	I1, А	S1, кВА	U2, кВ	I2, А	S2, кВА	
Шины ГПП (6кВ) (1 секция)	6,04	1014,89	10604,79	6,29	973,76	10596,2	-8,59
Подъемная установка 1	5,96	410,64	4235,22	6,24	390,07	4210,89	-24,326
Выемочный участок	5,71	353,19	3488,92	6,00	337,35	3501,69	-12,77
Участок конвейерного транспорта	5,77	278,01	2774,59	6,05	263,12	2753,95	-20,639
Шины ГПП (6 кВ) (2 секция)	6,26	843,97	9138,39	6,49	812,06	9117,53	-20,861
Участок водоотлива	6,23	30,5	328,75	6,53	28,37	320,479	-8,2706
Главная вентиляторная установка	6,22	279,43	3008,85	6,53	263,83	2980,46	-28,391
Проходческий участок 1	6,19	76,6	819,59	6,55	70,92	803,652	-15,938
Подъемная установка 2	6,21	427,66	4594,42	6,59	400	4560,28	-34,14
Проходческий участок 2	6,17	75,89	809,77	6,53	70,21	793,187	-16,583



Таблица 2 – Значения коэффициента спроса и коэффициента мощности для технологических процессов в условиях угольных шахт

Table 2 – Values of the demand coefficient and the power coefficient for technological processes in coal mines

Технологический процесс угольной шахты	Коэффициент спроса, K_c	Коэффициент мощности, $\cos\varphi$
Выемочные работы	0,4 – 0,5	0,6 – 0,7
Проходческие работы	0,35	0,6
Транспортные работы (конвейерный транспорт)	0,65	0,7
Работы по водоотливу	0,8	0,9
Работы по проветриванию горных выработок (Главная вентиляторная установка)	0,5	0,7
Транспортные работы (подъемная установка)	0,7	0,7
Прочие технологические работы (прочее оборудование)	0,7	0,7

Исходя из полученных данных и используя ряд коэффициентов, возможно определение значений потери активной мощности и объемов потерь активной энергии, связанное с наличием высших гармонических составляющих в системе электроснабжения угольной шахты.

Значение потери мгновенной активной мощности ΔP_i для отдельных основных элементов технологических процессов и технологических установок может быть определено как

$$\Delta P_i = \Delta S_i k_{ci} k_{mi} \cos\varphi_i,$$

где ΔS_i – разница полной мощности ΔS отдельных основных элементов технологических процессов и технологических установок до и после подключения ФКУ i -го элемента технологического процесса; k_{ci} – коэффициент спроса для технологических процессов в условиях угольных шахт i -го элемента технологического процесса; k_{mi} – коэффициент машинного времени работы технологического оборудования в условиях угольных шахт i -го элемента технологического процесса; $\cos\varphi_i$ – коэффициент мощности для технологических процессов в условиях угольных шахт i -го элемента технологического процесса.

Значение потери активной энергии ΔW_i для отдельных основных элементов технологических процессов и технологических установок может быть определено как:

$$\Delta W_i = \Delta P_i t_i,$$

где t_i – время фактической работы технологического оборудования i -го элемента технологического процесса угольной шахты.

Суммарное значение потери активной энергии ΔW может быть определено как сумма всех элементов технологических процессов и технологических установок.

Кроме того, построенные имитационные модели позволяют:

- определить гармонический состав по току и напряжению на различных участках схемы электроснабжения угольной шахты;
- определить источники высших гармоник в системе электроснабжения угольной шахты и их влияние на прочих потребителей электроэнергии;
- определить потери тока и напряжения в кабельных и воздушных линиях системы электроснабжения угольной шахты;
- разработать рациональную схему электроснабжения угольной шахты по критерию ограничения влияния высших гармонических составляющих напряжения и тока;
- определить оптимальные значения фильтрокомпенсирующих устройств для обеспечения нормативных значений суммарных коэффициентов гармонических искажений напряжения и тока в условиях угольной шахты;
- установить рациональное место размещения фильтрокомпенсирующих устройств в системе электроснабжения угольной шахты и их тип.



Выводы

В ходе проведенных исследований доказана эффективность установки пассивных фильтров высших гармоник на шинах ГПП угольной шахты с целью повышения уровня показателей качества электрической энергии, и, как следствие этого, повышение эффективности функционирования ЭТС угольной шахты. Также разработанная имитационная модель угольной шахты высокой производительности позволит определить оптимальные значения фильтрокомпенсирующих устройств для обеспечения регламентированного уровня показателей качества электроэнергии. Кроме того, модель обосновывает необходимость, по возможности, произвести гальваническую развязку в условиях системы электроснабжения угольной шахты между мощными потребителями с преобразовательной нагрузкой (подъемные установки) и прочими потребителями.

В ходе проведенного исследования обосновано применение декомпозиционного анализа для определения влияния преобразовательной нагрузки на качество электроэнергии применительно к системам электроснабжения угольных шахт. Предложена методика исследования режимов генерации высших гармонических составляющих преобразовательными устройствами в системах электропривода технологического оборудования угольных шахт с учетом влияния высших гармонических составляющих

Получен результат в виде ожидаемого снижения объемов потери активной энергии на 1,5%, вызванных наличием высших гармонических составляющих в ЭТС угольной шахты. Следует отметить, что в случае увеличения коэффициентов спроса для технологических процессов и машинного времени технологического оборудования ожидаемое значение снижения объемов потери активной энергии может достигать %. Кроме того, перспектива расширения использования регулируемых систем электроприводов с помощью ряда преобразовательных устройств в условиях угольных шахт высокой производительности, в том числе опасных по внезапным выбросам газа и пыли, актуализирует проведенные исследования влияния высших гармонических составляющих на эффективность функционирования электротехнического комплекса.

Список литературы

1. 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», 2009. – 396 с.
2. 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.
3. Meshkov A.A. Kazanin O.I. Sidorenko A.A. Improving the efficiency of the technology and organization of the longwall face move during the intensive flat-lying coal seams mining at the Kuzbass mines // Journal of Mining Institute 2021;(5):342-350. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.3
4. Босиков И.И., Ключев Р.В., Хетагуров В.Н. Анализ и комплексная оценка газодинамических процессов на угольных шахтах с помощью методов теории вероятности и математической статистики. Устойчивое развитие горных территорий. 2022. Т. 14. № 3 (53). С. 461-467.
5. Плащанский Л. А. Основы электроснабжения горных предприятий // Учебник для ВУЗов. – М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2005. – 499 с.
6. Миновский Ю.П. Эффективность электроснабжения угольных шахт. – М.: Недра, 1990. – 158 с.
7. Аракелов В.Е., Кремер А.И. Методические вопросы экономии энергоресурсов. – М., Энергоатомиздат, 1990. – 192 с.
8. 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.
9. 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.



10. Плащанский Л.А., Решетняк С.Н., Решетняк М.Ю. Повышение качества электрической энергии в подземных электрических сетях высокопроизводительных угольных шахт // Горные науки и технологии. 2022;7(1):66-77. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-1-66-77>.
11. 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.
12. Petrochenkov A.B. An information of industrial electrotechnical complexes. Russian Electrical Engineering. 2015. Vol. 86. No. 6. pp. 692–696.
13. Yu.A. Sychev, V.N. Kostin, V.A. Serikov, M.E. Aladin, Nonsinusoidal modes in power-supply systems with nonlinear loads and capacitors in mining. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2023, (1), pp. 159–179.
14. Y.A. Sychev, M.E. Aladin, S.V. Aleksandrovich, Developing a hybrid filter structure and a control algorithm for hybrid power supply. International Journal of Power Electronics and Drive Systems, 2022, 13(3), pp. 1625–1634.
15. Yu B. Industrial structure, technological innovation, and total-factor energy efficiency in China // Environmental Science and Pollution Research (2021) 27(8), pp. 8371-8385. DOI: 10.1007/s11356-019-07363-5
16. Huang H., Liang R., Lu C., Gong D., Yin S. Two-stage robust stochastic scheduling for energy recovery in coal mine integrated energy system // Applied Energy (2021) 290. DOI:10.1016/j.apenergy.2021.116759
17. Подунай С.В., Степанов Л.Г. Контроль качества электроэнергии содержащих высшие гармоники и пути устранения высших гармоник. В сборнике: Образование, наука и молодежь - 2022. Сборник трудов по материалам Научно-практической конференции студентов и курсантов. Керчь, 2022. С. 37-39.
18. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий //- М: Энергоатомиздат, 1994. - 272 с.
19. Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии. - М.: ЭНАС, 2009. - 456с.
20. Abramovich B., Sychev Y., Prokhorova V. The application of modern information technologies for power monitoring and control in conditions of distributed generation. Conference of Open Innovation Association, FRUCT, 2014, 2014-December, pp. 3–8, 7000938.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2025 Авторы. Издательство Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Информация об авторах

Решетняк Сергей Николаевич, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры «Энергетика и энергоэффективность горной промышленности»

e-mail: reshetniak@inbox.ru

Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук

111020, Россия, г. Москва, Крюковский тупик, 4

Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

119049, Россия, г. Москва, Ленинский проспект, 4, стр. 1

Лебедев Геннадий Михайлович, д.т.н., доц. каф. электроснабжения горных и промышленных предприятий

e-mail: lgm.egpp@kuzstu.ru

Маметьев Леонид Евгеньевич, д.т.н., проф. каф. горных машин и комплексов

e-mail: mle.gmk@kuzstu.ru

Черникова Татьяна Макаровна, д.т.н., проф. каф. электропривода и автоматизации

e-mail: chtm.oe@kuzstu.ru

ФГБОУ ВО Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева
650000, Россия, г. Кемерово, улица Весенняя, 28



UDC 621.31

TECHNICAL AND ECONOMIC ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF HIGHER HARMONIC COMPONENTS ON THE EFFICIENCY OF THE ELECTRO-TECHNICAL COMPLEX FUNCTIONING OF A COAL MINE

Sergey N. Reshetnyak ^{1, 2}, Gennady M. Lebedev ³, Leonid E. Mametyev ³,
Tatyana M. Chernikova ³

¹ Institute of Complex Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences

² National University of Science and Technology MISIS

³ T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University



Article info

Received:

14 December 2024

Revised:

25 January 2025

Accepted:

10 March 2025

Keywords: coal mine, power supply system, electro-technical system, higher harmonic components, power quality indicators, processing equipment, filter compensating devices, technical and economic assessment, efficiency of functioning

Abstract.

The publication presents the results of the study of technical and economic evaluation of the influence of higher harmonic components on the efficiency of functioning of the electrical system of a coal mine. The conducted research has allowed to substantiate the necessity to study the influence of higher harmonic components in the electrical system of a coal mine of high productivity. This is due to a significant increase in the number of equipment that uses in electric drive systems converter load, which generates higher harmonic components of voltage and current, negatively affecting the efficiency of the electrical complex of a coal mine. Exceeding the permissible level of higher harmonic components leads to violations of nominal modes of operation of the main technological equipment and as a result – a decrease in its productivity; false triggering of protections, as a consequence of this – downtime of sections and the mine as a whole, which leads to a decrease in coal production, an increase in the cost of its production. In addition, the service life of electrical equipment is reduced, including the wear of cable lines due to the violation of insulation, which leads to an increase in the probability of accidents. In order to solve this problem, it is proposed to use the method of simulation modeling of the electrical engineering complex of a coal mine, taking into account the decomposition of the power supply system, in order to techno-economic assessment of the impact of converter load on power quality indicators. A simulation model of the coal mine power supply system was synthesized in order to study the generation and damping of higher harmonic components when using filter compensating devices. As a result of the study, conclusions were obtained about the possibility of improving the efficiency of the electrical system of a coal mine, with the expected effect caused by the limitation of higher harmonic components will be about 1.5% of the volume of active energy losses.

For citation. Reshetnyak S.N., Lebedev G.M., Mametyev L.E., Chernikova T.M. Technical and economic assessment of the influence of higher harmonic components on the efficiency of the electro-technical complex functioning of a coal mine. *Journal of mining and geotechnical engineering*. 2025;1(28):4-21. DOI: 10.26730/2618-7434-2025-1-4-21, EDN: MLUVOQ

References

1. Ruban A.D., Artemyev V.B., Zaburdyaev V.S., Zaburdyaev G.S. Rudenko Y.F. Problems of ensuring high productivity of mine faces in methane-rich mines. *Moscow publishing house LLC*, 2009, 396 p. [In Russ.].
2. 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.



3. Meshkov A.A. Kazanin O.I. Sidorenko A.A. Improving the efficiency of the technology and organization of the longwall face move during the intensive flat-lying coal seams mining at the Kuzbass mines. *Journal of Mining Institute* 2021;(5):342-350. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.3 [In Russ.].
4. Bosikov I.I., Klyuev R.V., Khetagurov V.N. Analysis and complex estimation of gas-dynamic processes on coal mines with the help of methods of probability theory and mathematical statistics. *Sustainable development of mountain territories*. 2022;14(3-53):461-467. [In Russ.].
5. Plaschansky L. A. Fundamentals of power supply of mining enterprises. Textbook for universities. Moscow: Moscow State Mining University Publishing House, 2005, 499 p. [In Russ.].
6. Minovsky Y.P. Efficiency of the coal mines electrical supply. Moscow, Nedra Publishing House, 1990, 158 p. [In Russ.].
7. Arakelov V.E., Kremer A.I. Methodical issues of energy resources saving. Moscow, Energoatomizdat Publishing House, 1990, 192 p. [In Russ.].
8. Reshetnyak M.Yu. Investigation of harmonic composition in electric networks of a surface complex of high-productive coal mines. *Electrotechnical and information systems and complexes*. 2019;(4):61 -67. [In Russ.].
9. Lyakhomskiy, A.V.; Plaschanskiy, L.A.; Reshetnyak, S.N.; Reshetnyak, M.Yu. Analysis of the harmonic composition of the voltage in the underground electrical networks of the high-performance coal mines. *Industrial Energy*. 2021;(10):32-41. [In Russ.].
10. Plaschansky, L.A.; Reshetnyak, S.N.; Reshetnyak, M.Y. Improvement of the electrical energy quality in the underground electrical networks of the high-performance coal mines. *Mining Science and Technology*. 2022;7(1):66-77. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-1-66-77>. [In Russ.].
11. 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;86(6):305-308.
12. Petrochenkov A.B. An information of industrial electrotechnical complexes. *Russian Electrical Engineering*. 2015;86(6):692-696.
13. Yu.A. Sychev, V.N. Kostin, V.A. Serikov, M.E. Aladin. Nonsinusoidal modes in power-supply systems with nonlinear loads and capacitors in mining. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(1):159-179. [In Russ.].
14. Y.A. Sychev, M.E. Aladin, S.V. Aleksandrovich. Developing a hybrid filter structure and a control algorithm for hybrid power supply. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 2022;13(3):1625-1634.
15. Yu B. Industrial structure, technological innovation, and total-factor energy efficiency in China. *Environmental Science and Pollution Research*. 2021;27(8):8371-8385. DOI:10.1007/s11356-019-07363-5
16. Huang H., Liang R., Lu C., Gong D., Yin S. Two-stage robust stochastic scheduling for energy recovery in coal mine integrated energy system. *Applied Energy* 2021:290. DOI:10.1016/j.apenergy.2021.116759
17. Podunay S.V., Stepanov L.G. Electricity quality control containing higher harmonics and ways to eliminate higher harmonics. In *Collection: Education, Science and Youth – 2022. Collection of works on the materials of the Scientific and practical conference of students and cadets*. Kerch, 2022, pp. 37-39. [In Russ.].
18. Zhezhelchenko I.V. Higher harmonics in the power supply systems of industrial enterprises. Moscow, Energoatomizdat Publishing House. 1994, 272 p. [In Russ.].
19. Zhelezko Yu.S. Power losses. Reactive power. Quality of electric power. Moscow, ENAS Publishing House, 2009, 456 p. [In Russ.].
20. Abramovich B., Sychev Y., Prokhorova V. The application of modern information technologies for power monitoring and control in conditions of distributed generation. *Conference of Open Innovation Association, FRUCT*, 2014, pp. 3–8, 7000938.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2025 The Authors. Published by T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Information about the authors

Sergey N. Reshetnyak, C. Sc. in Engineering, Senior Researcher, Associate Professor of the Department “Energy and Energy Efficiency of Mining Industry”.
e-mail: reshetniak@inbox.ru

Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences
111020, Russia, Moscow, 4 Kryukovsky Tupik, Moscow



Решетняк С.Н. и др.

Технико-экономическая оценка влияния высших гармонических составляющих на эффективность функционирования...

DOI: 10.26730/2618-7434-2025-1-4-21

National Research Technological University MISIS
119049, Russia, Moscow, Leninsky Prospekt, 4, p. 1, str. 1

Gennady M. Lebedev, Dr. Sc. in Engineering, Associate Professor, Department of Electrical Supply of Mining and Industrial Enterprises

e-mail: lgm.egpp@kuzstu.ru

Leonid E. Mametyev, Dr. Sc. in Engineering, Department of Mining Machines and Complexes

e-mail: mle.gmk@kuzstu.ru

Tatiana M. Chernikova, Dr. Sc. in Engineering, Professor, Department of Electrical Drive and Automation

e-mail: chtm.oe@kuzstu.ru

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 Vesennyaya street, Kemerovo, 650000, Russian Federation

