

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова»

На правах рукописи



ПРАСОЛ ДМИТРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ В ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ
РУДНИЧНЫХ СЕТЯХ С МОЩНЫМИ ТИРИСТОРНЫМИ
ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции
и электроэнергетические системы

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Авербух Михаил Александрович

Белгород 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|----|
| Введение..... | 5 |
| Глава 1. Анализ электромагнитной обстановки в высоковольтных рудничных сетях с мощными тиристорными электроприводами..... | 12 |
| 1.1. Краткая характеристика высоковольтной системы электроснабжения рудничных электроприёмников на примере Яковлевского рудника..... | 12 |
| 1.2. Особенности применения электроприводов по системе ТП-Д подъемных установок на примере Яковлевского рудника..... | 17 |
| 1.3. Влияние мощных тиристорных электроприводов на показатели электромагнитной совместимости рудничных высоковольтных сетей..... | 21 |
| 1.4. Методы и технические средства, способствующие компенсации высших гармонических составляющих токов и напряжений..... | 32 |
| Выводы..... | 38 |
| Глава 2. Оценка электромагнитной обстановки в высоковольтной рудничной сети на примере Яковлевского рудника..... | 39 |
| 2.1. Экспериментальная оценка электромагнитной обстановки в высоковольтных рудничных сетях..... | 39 |
| 2.2. Имитационное моделирование высоковольтной рудничной системы электроснабжения подъемных установок..... | 51 |
| 2.3. Аналитическая оценка показателей электромагнитной совместимости в высоковольтной рудничной сети..... | 66 |
| Выводы..... | 77 |
| Глава 3. Обоснование технических средств для компенсации высших гармоник токов и напряжений в высоковольтных рудничных системах | 79 |

| | |
|--|-----|
| электроснабжения..... | |
| 3.1. Идентификация параметров и определение вероятностных характеристик случайных процессов изменения графиков нагрузок рудничных электроприемников..... | 79 |
| 3.2. Оценка потерь мощности в высоковольтной рудничной сети при несинусоидальных режимах..... | 89 |
| 3.3. Обоснование и расчет параметров фильтров для компенсации высших гармоник токов и напряжений в высоковольтной рудничной сети..... | 99 |
| 3.4. Оценка частотных характеристик высоковольтной рудничной сети..... | 112 |
| Выводы..... | 118 |
| Глава 4. Оценка эффективности компенсации высших гармоник и снижения потерь мощности в высоковольтной рудничной сети..... | 120 |
| 4.1. Выбор фильтрокомпенсирующих устройств на основании решения многокритериальной задачи оптимизации с использованием аппарата нечетких множеств | 120 |
| 4.2. Построение имитационных моделей высоковольтных рудничных систем электроснабжения с учетом мощных нелинейных электроприемников и установкой ФКУ..... | 128 |
| 4.3. Результаты имитационного моделирования в рудничных высоковольтных системах электроснабжения с установленными ФКУ..... | 132 |
| 4.4. Оценка экономической эффективности установки выбранных фильтрокомпенсирующих устройств..... | 137 |
| Выводы..... | 144 |
| Заключение..... | 146 |
| Список сокращений и условных обозначений..... | 148 |
| Список литературы..... | 150 |
| Приложения..... | 165 |

| | |
|--|-----|
| Приложение А. Экспериментальные исследования в высоковольтной рудничной сети..... | 165 |
| Приложение Б. Имитационные модели высоковольтной системы электроснабжения клетевой ПУ..... | 193 |
| Приложение В. Графики нагрузки высоковольтной системы электроснабжения клетевой ПУ..... | 195 |
| Приложение Г. Частотные характеристики высоковольтной системы электроснабжения клетевой подъемной установки «фильтр – внешняя сеть»..... | 197 |
| Приложение Д. Документы о внедрении результатов научного исследования..... | 199 |

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. К мощным нелинейным потребителям электроэнергии на современных рудодобывающих предприятиях относятся подъемные установки (ПУ) с электроприводами, выполненными по системе тиристорный преобразователь – двигатель постоянного тока с независимым возбуждением (ТП-Д), которые генерируют в питающую сеть высшие гармонические (ВГ) составляющие токов и напряжений. Это ведет к снижению качества электроэнергии и нарушению электромагнитной совместимости, к дополнительным потерям мощности и электроэнергии в элементах высоковольтных систем электроснабжения рудничных предприятий. Обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) и снижение потерь мощности и электроэнергии из-за наличия мощных электроприемников с нелинейными вольтамперными характеристиками являются важными и актуальными задачами как для рудодобывающих предприятий в частности, так и для современной энергетики в целом.

Степень разработанности темы. Задачи ЭМС в системах электроснабжения различного назначения, улучшения показателей качества электрической энергии, снижения потерь мощности, вызванные ВГ составляющими токов и напряжений, рассматривались как отечественными [1–74], так и зарубежными учёными [75–85].

В решение проблемы ЭМС и улучшения качества электроэнергии в системах электроснабжения различного назначения большой вклад внесли ученые Абрамович Б.Н., Агунов А.В., Арриллага Дж., Вагин Г.Я., Добрусин Л.А., Довгун В.П., Егоров А.Н., Жежеленко И.В., Железко Ю.С., Карташев И.И., Коверникова Л.И., Корнилов Г.П., Кузнецов Н.М., Николаев А.А., Плащанский Л.А., Розанов Ю.К., Семёнов А.С., Смирнов С.С., Тульский В.Н., Хабигер Э., Akagi H., Bhattacharya S., Baggini A., Chou C.J., Liu C.W., Zamora I. и др. Исследования и разработки таких учёных как Егоров А.Н., Кузнецов Н.М., Плащанский Л.А., Решетняк С.Н., Семёнов А.С. посвящены особенностям построения систем электроснабжения горных и рудодобывающих предприятий и оценке качества электроэнергии [17, 18, 34, 44–48, 51–54, 59–65, 86, 87].

Диссертации Васильева Е.И., Боярской Н.П., Долингера С.Ю., Егорова Д.Э., Жилина Е.В., Ключева Р.В., Колмакова В.О., Коржова Д.Н., Лимарова Д.С., Люта-ревича А.Г., Матиняна А.М., Селезнёва А.С., Сташкова И.А., Темербаева С.А., Третьякова Е.А. посвящены теме обеспечения ЭМС в системах электроснабжения различного назначения и разработке средств компенсации и снижения негативных воздействий ВГ токов и напряжений. В этих трудах рассматриваются причины возникновения ВГ составляющих токов и напряжений, технические средства для их подавления (пассивные, активные и гибридные фильтрокомпенсирующие устройства).

В ряде работ [88–91] рассмотрены некоторые аспекты ЭМС в высоковольтных системах электроснабжения горных предприятий, где показывается значительное влияние ВГ на элементы сети. Результаты получены имитационным моделированием, что подтверждает актуальность проблемы обеспечения ЭМС и снижения потерь мощности в высоковольтных системах электроснабжения горных и рудодобывающих предприятий. Однако акцент не делается на влияние мощных тиристорных электроприводов, выполненных по системе ТП-Д, работающих в повторно-кратковременных режимах, на ЭМС в рудничных высоковольтных системах электроснабжения.

Таким образом, задача обеспечения ЭМС и снижения потерь мощности в высоковольтных рудничных сетях с мощными тиристорными электроприводами ПУ является актуальной.

Объект исследования. Высоковольтная рудничная сеть, питающая мощные тиристорные электроприводы ПУ на примере Яковлевского рудника Белгородской области.

Предмет исследования. Электромагнитная обстановка в высоковольтной рудничной сети с мощными тиристорными электроприводами ПУ на примере Яковлевского рудника Белгородской области.

Область исследования соответствует паспорту специальности 05.14.02 «Электрические станции и электроэнергетические системы» в рамках которой: проводятся исследования по развитию и совершенствованию теоретической и технической базы электроэнергетики с целью обеспечения экономического и

надежного производства электроэнергии, ее транспортировки и снабжения потребителей электроэнергией в необходимом для потребителей количестве и требуемого качества.

Области исследования (по паспорту специальности): разработка методов контроля и анализа качества электроэнергии и мер по его обеспечению.

Цель работы – разработка и совершенствование методов и средств по обеспечению ЭМС в высоковольтных рудничных сетях с мощными тиристорными электроприводами постоянного тока на примере Яковлевского рудника Белгородской области.

Для достижения поставленной цели решаются следующие **задачи**:

1. Выявление особенностей электромагнитной обстановки в высоковольтной рудничной сети с мощными тиристорными электроприводами на базе системы ТП-Д с нелинейными вольтамперными характеристиками на основании экспериментальных исследований, имитационного моделирования и аналитических расчетов с учетом динамических режимов работы ПУ.

2. Идентификация параметров и определение вероятностных характеристик случайных процессов изменения нагрузок в высоковольтной рудничной системе электроснабжения с целью выявления наиболее вероятного диапазона значений токов нагрузки и токов искажения для выбора технических средств компенсации ВГ токов и напряжений.

3. Разработка имитационных моделей систем электроснабжения скиповой и клетевой ПУ в системе Matlab с пакетом расширений Simulink и библиотекой SimPowerSystems, позволяющие проводить исследования электромагнитной обстановки с учетом динамических режимов работы в соответствии с выполняемыми диаграммами движения.

4. Выполнение оценки уровня дополнительных потерь мощности при несинусоидальных режимах в высоковольтной рудничной сети, анализ и расчет параметров фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ) для компенсации ВГ токов и напряжений. Оценка частотных характеристик высоковольтных систем электроснабжения ПУ «ФКУ – внешняя сеть». Выбор ФКУ для компенсации ВГ токов и напряжений на основании решения многокритериальной задачи оптимизации с

использованием аппарата нечетких множеств.

Связь работы с научными программами. Исследования по данной тематике проводились в соответствии с приказом филиала ПАО «МРСК Центра» – «Белгородэнерго» от 26.10.2017 г. № 363-ЦА «Об утверждении и организации исполнения Программы экспериментальных исследований по выявлению дополнительных факторов, влияющих на объем технологических потерь» в исполнении вводимого в 2018 г. Министерством энергетики Российской Федерации подхода к расчету технологических потерь для снижения в потерях «коммерческой» составляющей.

В результате выполнения диссертационной работы получены следующие **новые научные результаты**:

1. На основании экспериментальных, имитационных и теоретических исследований в высоковольтной рудничной сети на примере Яковлевского рудника Белгородской области установлено значительное влияние мощных тиристорных электроприводов на уровень ВГ токов и напряжений с учетом динамических режимов работы ПУ.

2. Разработана методика идентификации параметров и определения вероятностных характеристик случайных процессов изменения нагрузок в высоковольтной рудничной системе электроснабжения с целью выявления наиболее вероятного диапазона значений токов нагрузок и токов искажения для выбора технических средств компенсации ВГ токов и напряжений.

3. Разработана имитационная модель систем электроснабжения высоковольтной рудничной сети рудодобывающего предприятия с моделями электроприводов ПУ, выполненных по системе ТП-Д, с учетом реальных настроек регуляторов на технический оптимум в замкнутых системах подчиненного регулирования, реализующих заданные диаграммы движения в системе Matlab с пакетом расширений Simulink и библиотекой SimPowerSystems.

4. На основании решения многокритериальной задачи оптимизации с использованием аппарата нечетких множеств предложена и обоснована целесообразность применения ФКУ, устанавливаемых в высоковольтной рудничной сети, обеспечивающих ЭМС между мощными тиристорными электроприводами и си-

стемой внешнего рудничного электроснабжения.

Методы научных исследований. Для достижения поставленных целей и решения задач использованы основные положения теоретической электротехники, методов расчета и построения схем замещения систем электроснабжения, построения частотных характеристик электрических сетей, канонических схем реактивных двухполюсников, теории вероятности и математической статистики, задач оптимизации, аппарата нечетких множеств, математического моделирования. Анализ дополнительных потерь мощности проводился на основе экспериментальных исследований при помощи сертифицированных приборов, а также на основе имитационного моделирования в системе Matlab с пакетом расширений Simulink и библиотекой SimPowerSystems.

Достоверность диссертационной работы и выводов базируется на фундаментальных классических положениях и законах электротехники и математики, общей теории вероятности и математической статистики, применении действующих стандартов и нормативных документов, подтверждается результатами экспериментальных исследований, проведенных автором в высоковольтной рудничной сети действующего предприятия. Также достоверность подтверждается хорошей сходимостью результатов экспериментальных исследований, имитационного моделирования и аналитических расчетов, высокой корреляцией данных и результатов расчетов, исключением систематических и случайных погрешностей на основании методики обработки результатов измерений.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в следующем:

1. Применение результатов исследований позволит снизить влияние ВГ токов и напряжений и уменьшить потери мощности в элементах высоковольтной рудничной системы электроснабжения.

2. Разработаны имитационные модели высоковольтных систем электроснабжения ПУ в системе Matlab с пакетом расширений Simulink и библиотекой SimPowerSystems, позволяющих отслеживать электромагнитную обстановку.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты экспериментальных, имитационных и аналитических иссле-

дований, позволивших выявить особенности ЭМС в высоковольтных рудничных сетях с мощными тиристорными электроприводами, выполненными по системе ТП-Д, с учетом динамических режимов.

2. Метод идентификации параметров и определения вероятностных характеристик случайных процессов изменения нагрузок в высоковольтной рудничной системе электроснабжения с целью выявления наиболее вероятного диапазона значений токов нагрузки и токов искажения для выбора технических средств компенсации ВГ токов и напряжений.

3. Методика выбора ФКУ для компенсации ВГ токов и напряжений на основании решения многокритериальной задачи оптимизации с использованием аппарата нечетких множеств.

4. Имитационная модель с установкой ФКУ, обеспечивающая оптимальную электромагнитную обстановку в высоковольтной рудничной сети, питающей мощные тиристорные электроприводы ПУ.

Сведения о внедрении результатов. Теоретические и прикладные результаты диссертации внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» при подготовке магистров по направлению 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» в рамках дисциплин «Качество электрической энергии» и «Электромагнитная совместимость в системах электроснабжения».

Личный вклад автора состоит в постановке задачи; проведении экспериментальных исследований и разработке имитационной модели высоковольтной рудничной системы электроснабжения ПУ с мощными тиристорными электроприводами. В работах, выполненных в соавторстве, автору принадлежат постановка задачи, экспериментальные, имитационные и теоретические исследования, обработка результатов исследований.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на:

- Международной научно-практической конференции «Наукоемкие технологии и инновации», Белгород, 2016 г.;
- Международной научно-практической конференции «Интеграция со-

временных научных исследований в развитие общества», Кемерово, 2016 г.;

– I Международной научно-технической конференции «Энергетические, управляющие и информационные системы», Белгород, 2016 г.;

– X Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и научно-технический прогресс», г. Губкин, 2017 г.;

– Международной научно-технической конференции молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, Белгород, 2017 г.;

– Международной научно-практической конференции «Электротехнические комплексы и системы», Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т., Уфа, 2017 г.;

– Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 100-летнему юбилею первого ректора Политехнического института В.Н. Борисова, Красноярск, 2017 г.;

– IX Международном молодежном форуме «Образование. Наука. Производство», Белгород, 2017 г.;

– Международной научно-технической конференции «Электроэнергетика и электротехника», Воронеж, 2018 г.;

– Международной научно-технической конференции молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, Белгород, 2018 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 19 печатных работ, в том числе четыре статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ для опубликования результатов диссертационных исследований, и одна статья, индексируемая в Scopus.

Структура и объём работы. Диссертация включает введение, четыре главы основного текста, заключение, список сокращений и условных обозначений, список литературы из 140 наименований и пять приложений. Общий объём диссертации 199 страниц, в тексте содержится 53 рисунка и 39 таблиц.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ В ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ РУДНИЧНЫХ СЕТЯХ С МОЩНЫМИ ТИРИСТОРНЫМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

В главе приводится характеристика высоковольтной рудничной сети, питающей мощные электроприводы ПУ, выполненные по системе ТП-Д, с нелинейными вольтамперными характеристиками как объекта исследования на примере Яковлевского рудника, расположенного в Белгородской области. На основании анализа работ отечественных и зарубежных авторов выявлены негативные влияния высших гармоник тока и напряжения на элементы высоковольтной рудничной сети и возможные потери активной мощности и электроэнергии. Для улучшения качественных характеристик и снижения потерь активной мощности и электроэнергии в системах электроснабжения рудничных предприятий могут использоваться различные технические и организационные мероприятия. В данной главе рассматривается классификация мероприятий и технических средств, их особенности и область применения.

1.1. Краткая характеристика высоковольтной системы электроснабжения рудничных электроприёмников на примере Яковлевского рудника

Яковлевское месторождение, расположенное в Белгородской области, является одним из крупнейших месторождений Курской магнитной аномалии с богатейшей сырьевой базой. Запасы железной руды составляют более 9 млрд т. Уникальность руды этого месторождения заключается в высоком содержании железа – 60–62 %, что свидетельствует о ее высоком качестве. Рудные залежи Яковлевской полосы наблюдаются на протяжении 40 км, образуя единую крупную залежь, имеющую в плане лентообразную форму, вытянутую в соответствии с простиранием железистых кварцитов в северо-западном направлении. Ширина рудной залежи колеблется от 200 до 600 м, составляя в среднем 440 м, глубина залегания богатых руд составляет 440–550 м.

В 2005 г. началась непосредственная добыча железной руды. В 2011 г. была достигнута проектная мощность по добыче железной руды 1,0 млн т в год.

С каждым последующим годом происходит наращивание добычи железной руды, с этой целью осуществляется строительство II очереди Яковлевского рудника мощностью 4,5 млн т сырой руды в год. Добыча железной руды осуществляется подземным способом. Шахтное поле вскрывается тремя вертикальными стволами: скиповым, клетьевым и вентиляционным диаметром 7,5 м в свету и системой квершлагов. В технологии добычи железной руды применяются мощные потребители: вентиляторы главного проветривания, компрессорные станции, подъемные установки и насосы главного водоотлива.

Высоковольтная система электроснабжения рудничных электроприёмников на примере Яковлевского рудника является объектом исследования данной работы (рисунок 1.1). При этом можно выделить следующие энергоёмкие объекты: здание подъёмных машин (ЗПМ) с подъемными установками, компрессорная, котельная, центральные подземные подстанции (ЦПП), дробильно-сортировочная фабрика, железнодорожный участок.

Наиболее мощными и энергоёмкими потребителями в этой системе электроснабжения являются две подъемные установки – клетевая и скиповая. Данные установки используются для подъема на поверхность добываемой породы, спуска и подъема людей, горно-шахтного оборудования и материалов и т.п.

Основной особенностью высоковольтной системы электроснабжения следует считать наличие мощной нелинейной нагрузки в виде электроприводов ПУ, выполненных по системе ТП-Д. Электроснабжение мощных тиристорных электроприводов ПУ осуществляется непосредственно от распределительного устройства 6 кВ (РУ-6 кВ), расположенного в здании подъемных машин, которое присоединено к секциям шин главной понизительной подстанции (ГПП) рудника (рисунок 1.2).

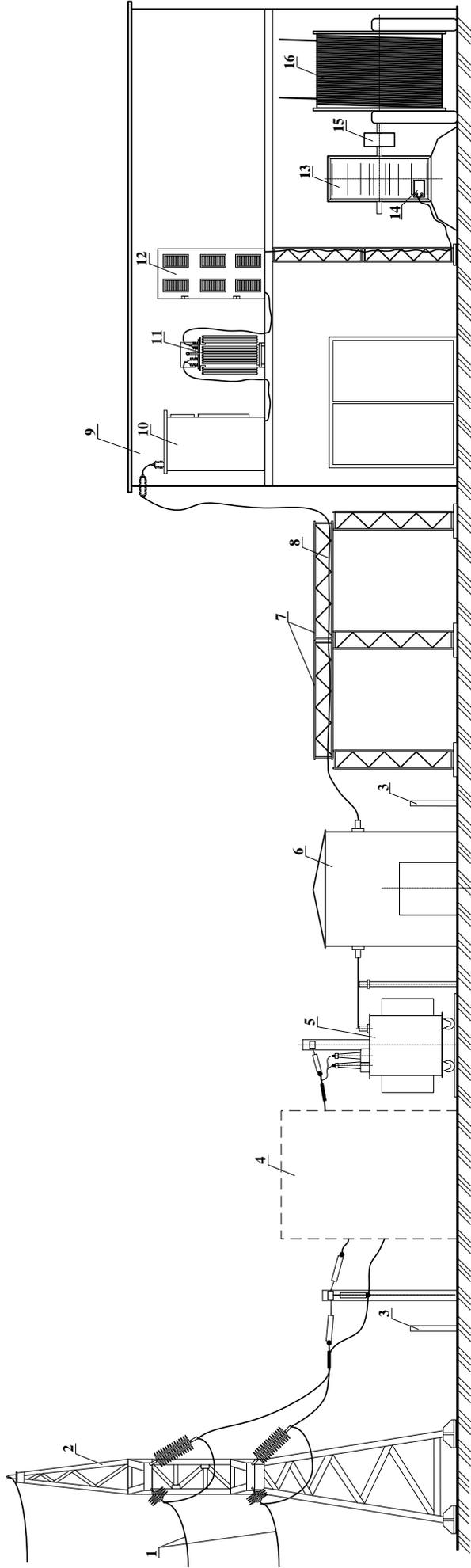


Рисунок 1.2. Схема присоединения мощных тиристорных электроприводов к системе электроснабжения рудника:

1 – воздушная линия 110 кВ; 2 – металлическая опора ВЛ-110 кВ; 3 – ограждение; 4 – открытое распределительное устройство 110 кВ (ОРУ-110 кВ) ГПП; 5 – силовой трансформатор ТРДН-25000/110; 6 – закрытое распределительное устройство 6 кВ (ЗРУ-6 кВ) ГПП; 7 – кабельная эстакада; 8 – кабельная линия от ЗРУ-6 кВ ГПП до здания подъемных машин $L = 450$ м; 9 – здание подъемных машин; 10 – ячейки РУ-6 здания подъемных машин; 11 – согласующий трансформатор; 12 – шкаф тиристорного преобразователя; 13 – подъемный двигатель; 14 – клеммная коробка; 15 – муфта; 16 – орган навивки (барaban) с подъемными канатами

Внешнее электроснабжение Яковлевского рудника осуществляется по двум воздушным линиям 110 кВ, отпайкой от двухцепной ВЛ 110 кВ от подстанции 330/110 кВ «Белгород-330» от двух трансформаторов и секций шин, которые запитаны от Курской и Воронежской атомных электрических станций. Силовые трансформаторы, установленные на ГПП, – ТРДН-25000/110. При этом расщепленные обмотки низшего напряжения силовых трансформаторов соединены параллельно для снижения индуктивности входных цепей переменного тока, тем самым увеличивая индуктивность со стороны постоянного тока. Такое решение применяется в системах электроснабжения с мощными тиристорными преобразователями для их работы на активно-индуктивную нагрузку с целью наилучшего сглаживания выходного тока и напряжения.

Таблица 1.1 – Параметры воздушных и кабельных линий, силовых и согласующих трансформаторов высоковольтной системы электроснабжения

Яковлевского рудника

| Параметры воздушных линий 110 кВ | | | | | | | |
|---|---------------------------|------------------------------------|------------------------|------------------|-------|----------------------|-----------|
| Марка провода | Длина, км | $r_{уд}$, Ом/км | | $x_{уд}$, Ом/км | | $b_{уд}$, мкСм/км | |
| АС-185 | 40,6 | 0,159 | | 0,413 | | 2,747 | |
| Параметры кабельных линий 6 кВ | | | | | | | |
| Марка кабеля | Длина, км | $r_{уд}$, Ом/км | | $x_{уд}$, Ом/км | | $b_{уд}$, мкСм/км | |
| ААБлГ-6,3×150 | 0,45 | 0,206 | | 0,074 | | 288,889 | |
| Паспортные данные силовых и согласующих трансформаторов | | | | | | | |
| Тип | Номинальная мощность, кВА | Номинальное напряжение обмоток, кВ | | Потери, кВт | | u_k , % (ВН-НН) | i_x , % |
| | | ВН | НН | P_x | P_k | | |
| ТРДН-25000/110 | 25000 | 115 | 6,3-6,3 | 27 | 120 | 10,5 | 0,7 |
| ТДТП-8000/10 У2 | 6150 | 6,0 | 1,05-1,05 (0,9-0,9) | 6,3 | 53,3 | 6,0 | 0,145 |
| ТСЗП-4000/10 У3 | 4000 | 6,0 | 0,825 | 6,4 | 25 | 7,4 | 1 |

Питание электроприводов клетевой установки осуществляется через согласующий трансформатор типа ТДТП-8000/10 У2, скиповой – через два параллель-

но работающих согласующих трансформатора типа ТСЗП-4000/10 УЗ. Параметры согласующих и силовых трансформаторов представлены в таблице 1.1 [92, 93].

Таким образом, исследуемая высоковольтная система электроснабжения Яковлевского рудника имеет значительное количество энергоемких потребителей. К наиболее мощным электроприёмникам рудничной системы электроснабжения относятся электроприводы клетевой и скиповой подъемных установок, которые имеют нелинейные вольтамперные характеристики.

1.2. Особенности применения электроприводов по системе ТП-Д подъемных установок на примере Яковлевского рудника

Однолинейные функциональные схемы силовой части электроприводов скиповой и клетевой ПУ представлены на рисунке 1.3.

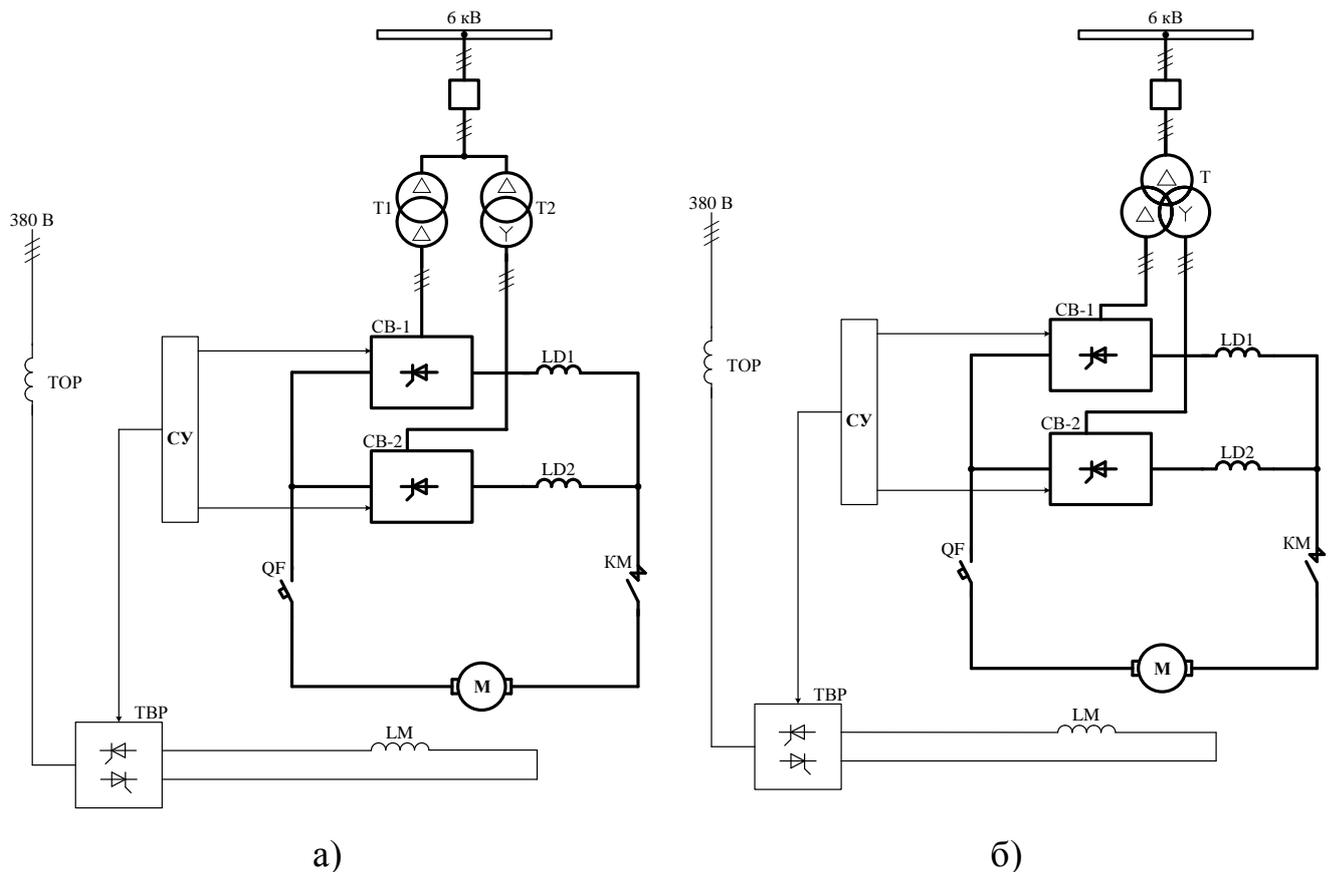


Рисунок 1.3. Однолинейная функциональная схема силовой части электропривода:

а – скиповой ПУ; *б* – клетевой ПУ

Электроприводы подключены к соответствующим секциям шин РУ-6 кВ здания подъемных машин. Параметры электроприводов ПУ представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Параметры подъемных двигателей и тиристорных преобразователей ПУ

| Подъемная установка | Подъемный двигатель (ДПТ) | | | | | Силовой тиристорный преобразователь | | | | |
|---------------------|---------------------------|---------------------------|--|---|--|-------------------------------------|-----------------------------|--|---------------------------------------|---------------------------|
| | Тип | Номинальная мощность, кВт | Номинальное напряжение якоря $U_{я\text{ном}}$, В | Номинальный ток якоря $I_{я\text{ном}}$, А | Номинальная частота вращения $n_{\text{ном}}$, об/мин | Тип | Длительно-допустимый ток, А | Выпрямленное напряжение $U_{\text{ном}}$, В | Выпрямленный ток $I_{\text{ном}}$, А | Номинальная мощность, кВт |
| Скиповая ПУ | П2Ш-800-256-7К УХЛ4 | 5000 | 930 | 5790 | 50 | УКТЭШ- 6300/1050-211- 500УХЛ4 | 9000 | 1050 | 6300 | 6615 |
| Клетевая ПУ | П2-25/105- 3,55УХЛ4 | 3550 | 930 | 4100 | 40 | УКТЭШ-6300/930- 211-500УХЛ4 | 9000 | 930 | 6300 | 5859 |

В состав преобразователей входят две тиристорных секции типа СВ, включенные параллельно. Каждая секция силового тиристорного преобразователя подключена к соответствующей обмотке НН согласующих трансформаторов, соединение обмоток которых выполнено по схемам, обеспечивающим 12-пульсную схему выпрямления. Дополнительное оборудование, входящее в состав преобразователей:

1. Щит силового типа, состоящий из шкафа управления автоматическим выключателем и шкафа управления линейными контакторами.

2. Тиристорный возбудитель ЭКТ 500/440-95 УХЛ4.

3. Шкаф, содержащий систему автоматического регулирования скорости электропривода, систему управления тиристорным преобразователем для питания якоря электродвигателя, а также цепи защиты, диагностики, сигнализации и индикации неисправности.

4. Тиристорный выпрямитель ЭКТ 50/220-86С УХЛ4 (ЭКТ), используемый в качестве источника постоянного напряжения 220 В, 50 А для питания шкафа управления автоматическим выключателем и линейными контакторами, и шкафов технологической автоматики.

Скиповая подъемная установка работает в циклическом режиме подъема-опускания двух сосудов: загруженный сосуд поднимается вверх, пустой сосуд движется вниз. Время движения подъемных сосудов за цикл – 160 с. Фактическая максимальная скорость – 7,8 м/с. Максимальное ускорение в период разгона – 0,7 м/с². Максимальное замедление в период торможения – 0,8 м/с². Скоростной режим работы скиповой подъемной установки и изменение тока якоря двигателя постоянного тока представлены на рисунке 1.4.

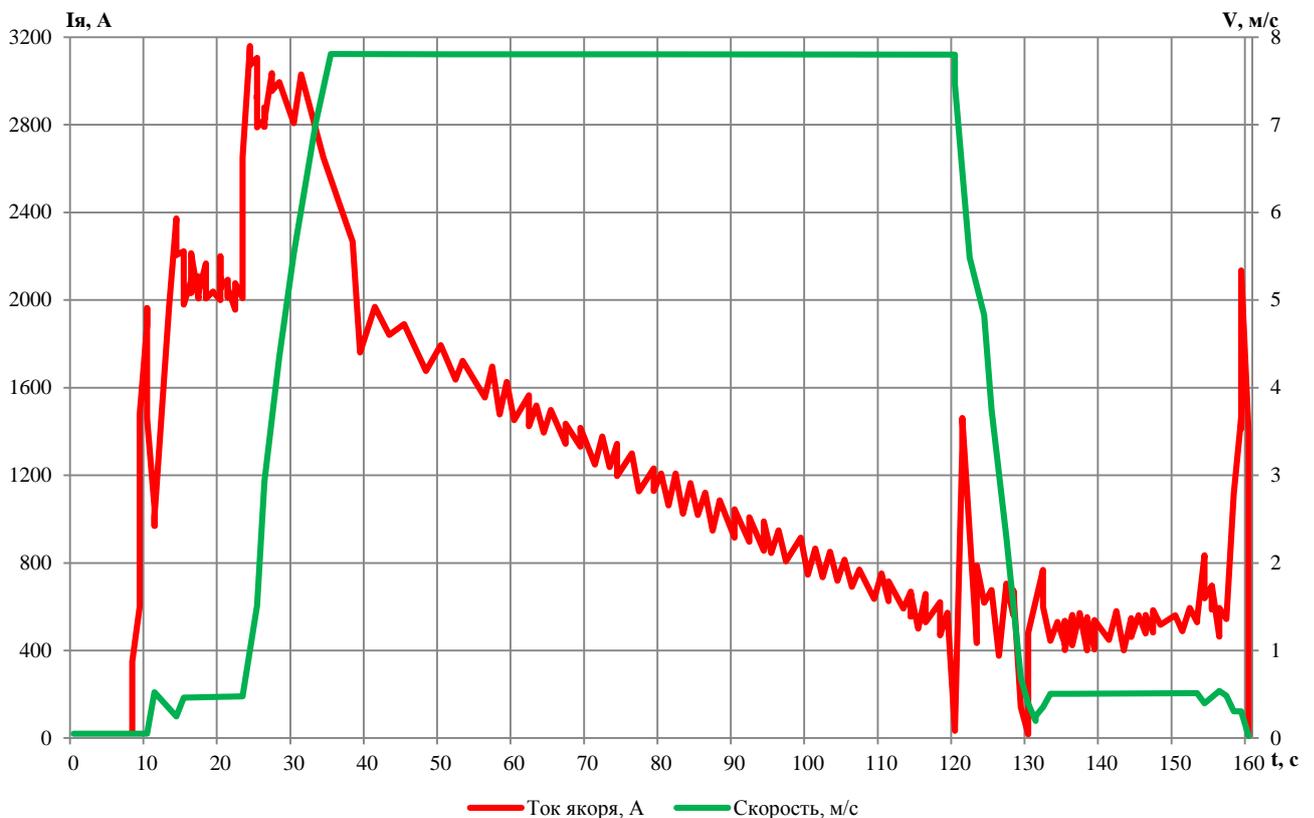


Рисунок 1.4. Диаграммы изменения скорости подъемного сосуда и тока якоря двигателя скиповой ПУ за цикл

Заданная диаграмма изменения скорости подъемного сосуда достигается посредством регулируемого электропривода, выполненного по системе ТП-Д.

При этом установившийся режим работы скиповой подъемной установки составляет 85 с, а переходные или динамические режимы составляют: разгона – 35 с, торможения – 40 с. Таким образом, за один цикл динамические процессы составляют более 46 % от общего времени одного полного цикла. Заданная скорость движения сосудов достигается за счет изменения угла управления, который определяется по известным значениям частоты вращения подъемного двигателя и току якоря двигателя.

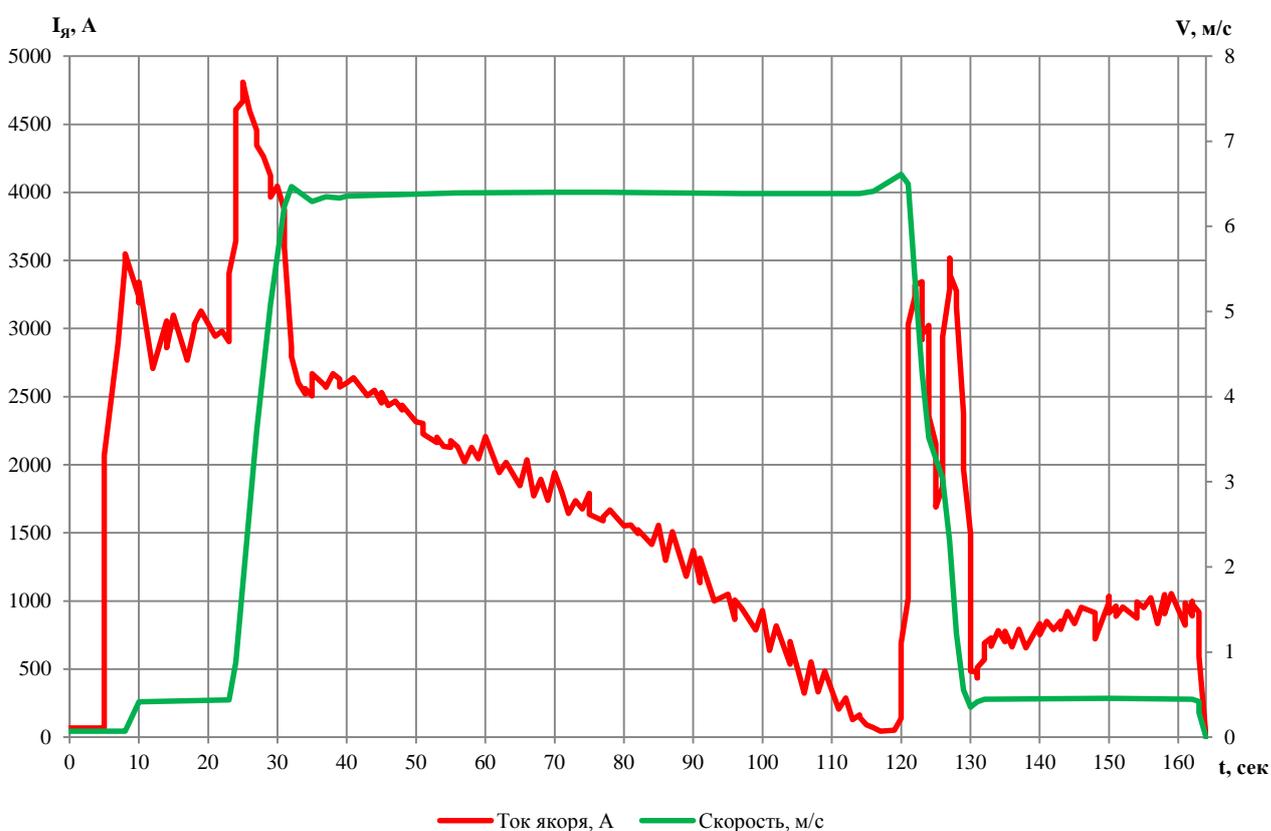


Рисунок 1.5. Диаграммы изменения скорости подъемного сосуда и тока якоря двигателя клетевой ПУ за цикл

Клетевая подъемная установка также работает в циклическом режиме подъема-опускания клетки с противовесом по заданной диаграмме изменения скорости (рисунок 1.5). Время движения клетки за цикл – 170 с. Расчетная максимальная скорость – 10 м/с, допустимая скорость – 7 м/с, фактическая максимальная скорость – 6,4 м/с. Максимальное ускорение в период разгона – 0,8 м/с²;

максимальное замедление в период торможения – $0,8 \text{ м/с}^2$. При этом установившийся режим работы клетевой подъемной установки составляет 85 с, а переходные или динамические режимы составляют: разгона – 35 с, торможения – 44–50 с. Таким образом, за один цикл динамические процессы составляют около 50 % от общего времени одного полного цикла.

В рассматриваемых электроприводах применяются замкнутые системы управления, построенные по принципу подчиненного регулирования. Системы подчиненного регулирования ТП-Д включают в себя: внешние контуры скорости и внутренние контуры тока якорей двигателей. В контурах используются пропорционально-интегральные регуляторы скорости и тока. Задающие воздействия на начало движения с дальнейшей реализацией диаграмм изменения скоростей подъемных сосудов осуществляются с помощью командоаппаратов через блоки задания скоростей.

Анализ электроприводов подъемных установок Яковлевского рудника показал, что данные установки являются мощными электроприёмниками с нелинейными вольтамперными характеристиками, генерирующими в высоковольтную питающую сеть токи высших гармоник. Кроме этого, важной особенностью подъемных установок Яковлевского рудника является наличие в цикле работы динамических процессов, составляющих 46–50 % от времени общего цикла.

1.3. Влияние мощных тиристорных электроприводов на показатели электромагнитной совместимости рудничных высоковольтных сетей

Основными источниками высших гармоник в настоящее время являются выпрямители и инверторы с фазовым управлением. Их подразделяют на три большие группы [8]:

- 1) большие преобразователи, используемые в металлургии или в передачах постоянного тока высокого напряжения;
- 2) преобразователи средней мощности, используемые в промышленности для управления мощными электродвигателями и на железных дорогах;

3) маломощные преобразователи однофазных устройств, к которым относится современная бытовая техника.

Мощные преобразователи (несколько мегаватт) обычно имеют со стороны постоянного тока индуктивность много большую, чем со стороны переменного тока. При этом преобразователь ведет себя как источник гармоник напряжения на стороне постоянного и как источник гармоник тока – на стороне переменного тока. Кроме этого, в симметричной системе переменного тока результирующие токи равны во всех фазах [8].

Таким образом, выпрямители (вентильные преобразователи, тиристорные преобразователи) являются источниками высших гармоник переменного тока, генерируемых в питающую сеть.

Вентильные преобразователи представляют собой устройства для преобразования электрического тока, напряжения, частоты с помощью электронных вентилях. В современной энергетике существует большое количество разнообразных силовых вентильных преобразователей, предназначенных для определенного рода задач. Согласно [94], силовые преобразователи подразделяют на группы без преобразования частоты и с преобразованием частоты. При этом все виды выпрямителей относятся к классификационной группе с преобразованием частоты.

В электроприводах рассматриваемых ПУ используются тиристорные преобразователи, выполненные по схемам, представленным на рисунке 1.6.

Питание клетевой ПУ осуществляется от трехфазного согласующего трансформатора с вторичной расщепленной обмоткой, одна из которых соединена звездой, а вторая – треугольником. Скиповая ПУ питается от двух трехфазных согласующих трансформаторов, причем вторичная обмотка одного из них соединена на треугольником, а у другого – звездой.

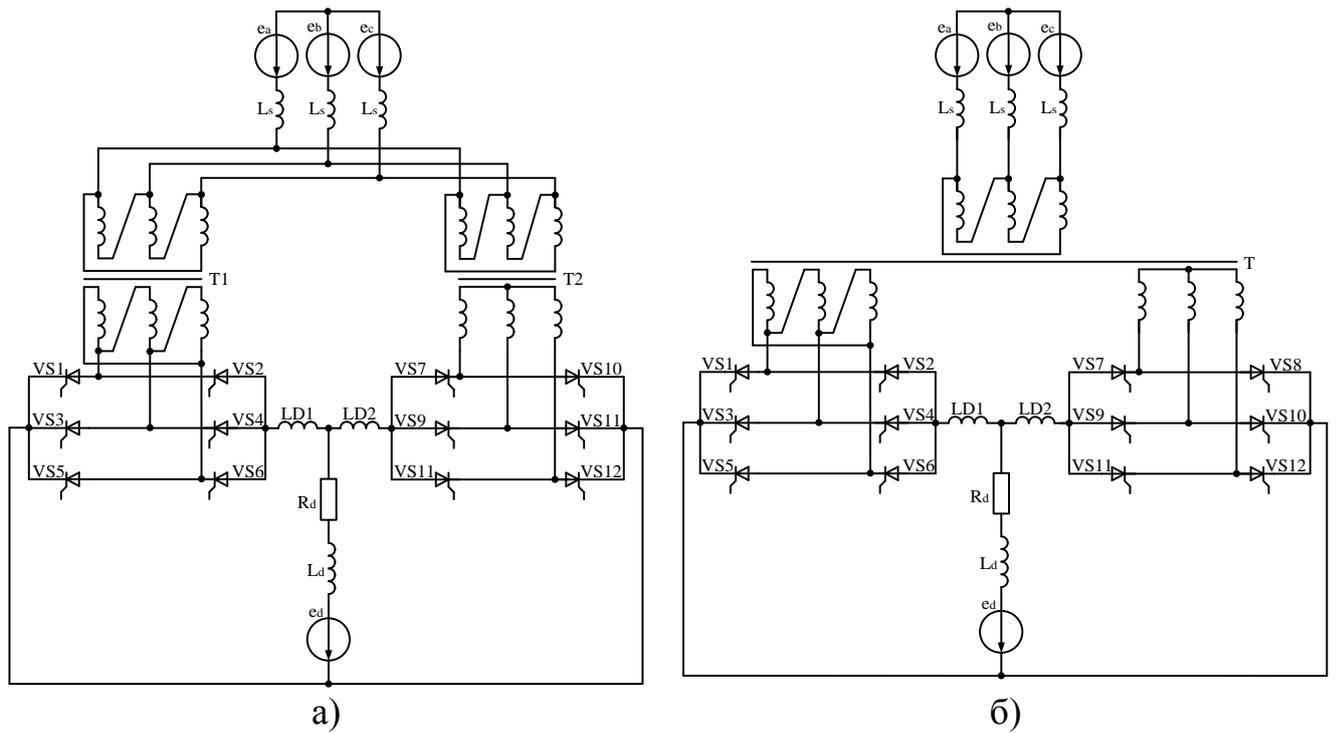


Рисунок 1.6. Схема 12-пульсного тиристорного преобразователя:

а – скиповой ПУ; *б* – клетевой ПУ

В процессе работы такого выпрямителя происходит чередование пар вентилей. Здесь возможно возникновение режима, когда две пары вентилей находятся в работе (первые еще не вошли в режим запираения, а вторые уже работают в режиме выпрямления). Для учета этого явления была введена такая характеристика, как угол коммутации γ . Согласно [95], углом коммутации γ считается угол временной диаграммы, во время которого вентили, участвующие в коммутации, одновременно проводят ток. В эти моменты работы выпрямителей в сигнале напряжения появляются искажения и помехи, параметры которых напрямую зависят от схемы и числа фаз выпрямления, а также параметров питающей сети. Это вызывает появление ряда гармоник, кратных основной частоте. Согласно [96], порядок высших гармоник, генерируемых в сеть системой ТП-Д, определяется формулой:

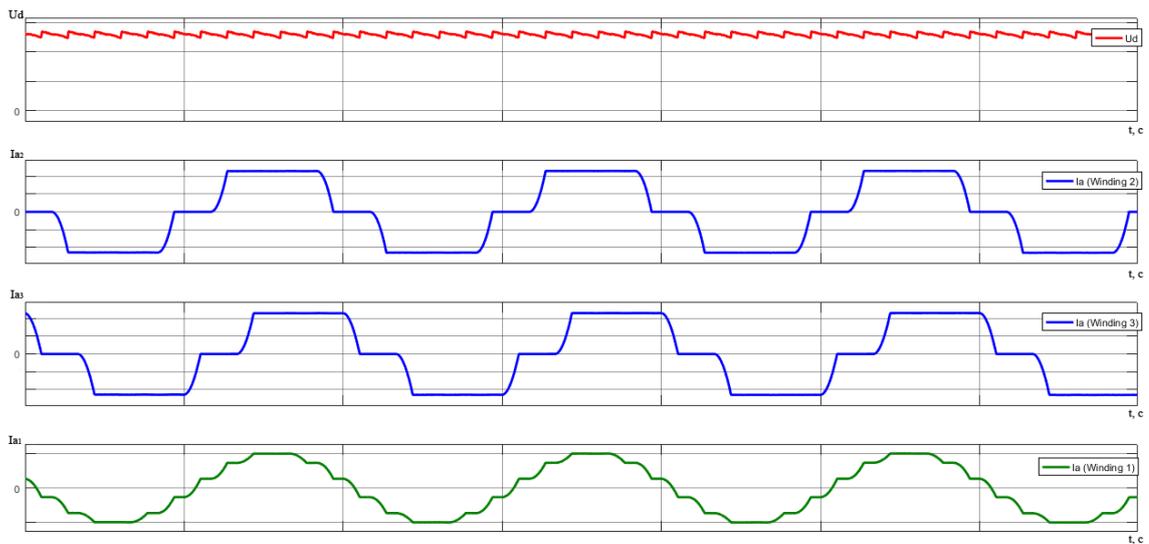
$$v = mk \pm 1, \quad (1.1)$$

где m – число фаз выпрямителя;

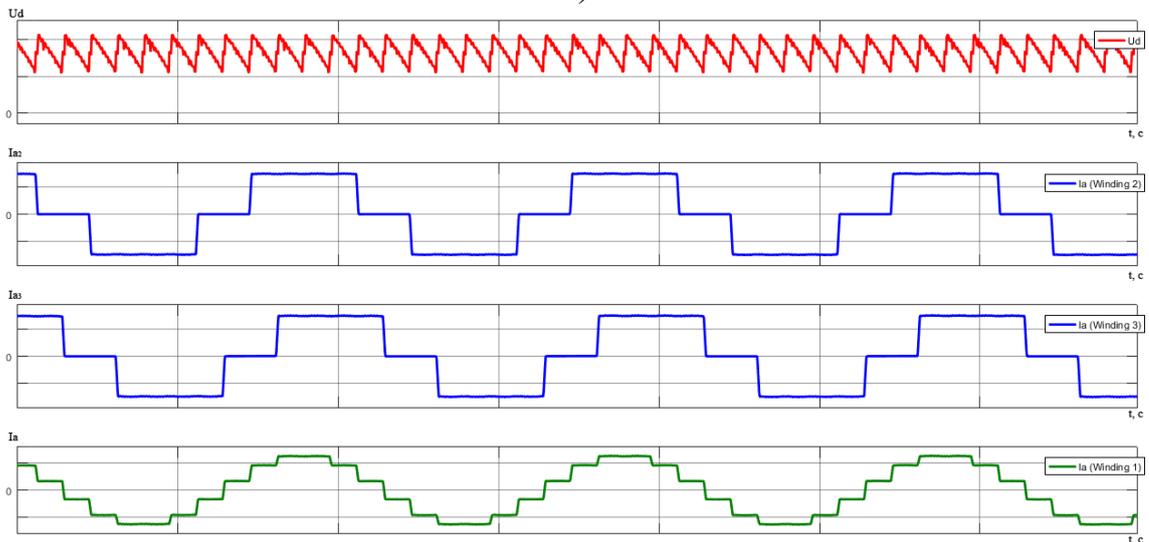
k – ряд натуральных чисел, $k = 0; 1; 2; \dots$

Согласно формуле (1.1), для 12-пульсной схемы выпрямления в питающем напряжении присутствуют гармоники 11, 13, 23, 25, 35 и 37-го порядка. Времен-

ная диаграмма тока в фазе первичной обмотки согласующего трансформатора представляет собой ступенчатую фигуру, приближающуюся к синусоиде. На рисунке 1.7 показаны осциллограммы выпрямленного напряжения 12-пульсной схемы выпрямления при углах управления 0° и 50° , фазных токов в обмотках согласующего трансформатора. На рисунке 1.8 представлен рабочий частотный спектр при угле управления 50° . Осциллограммы приведены для случая работы управляемого выпрямителя на двигатель постоянного тока с независимым возбуждением.



а)



б)

Рисунок 1.7. Осциллограммы выпрямленного напряжения 12-пульсной схемы выпрямления, фазных токов в обмотках согласующего трансформатора:

a – при угле управления 0° ; *б* – при угле управления 50°

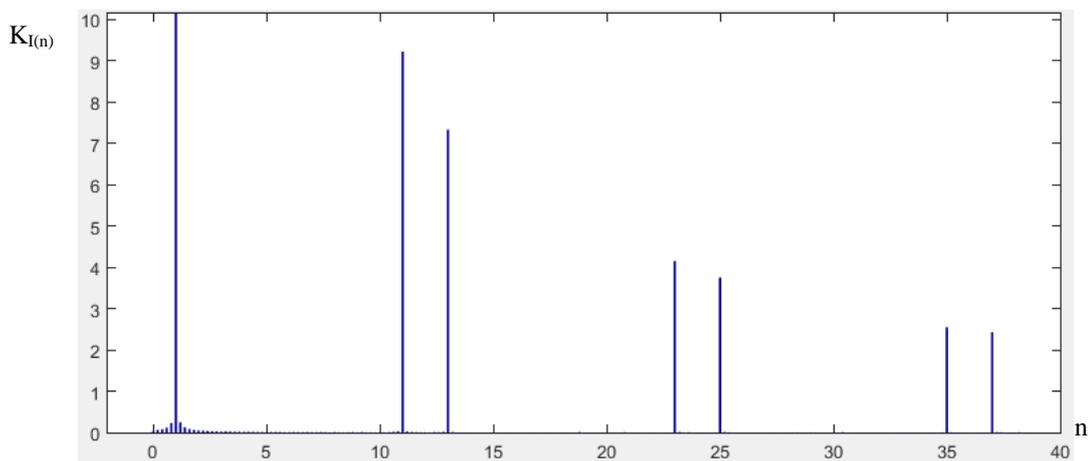


Рисунок 1.8. Рабочий частотный спектр 12-пульсной схемы при угле управления 50°

Как следует из рисунков 1.7 и 1.8, искажения напряжения и токов во входных цепях тиристорных преобразователей являются следствием коммутации вентилей. Тиристорный преобразователь во время коммутации вентилей производит подключение нагрузки к соответствующей фазе без разрыва тока, поступающего из предыдущей фазы, что приводит к периодическим междуфазным коротким замыканиям (КЗ) в питающей сети. В кривой напряжения в процессе коммутации появляются коммутационные искажения, форма, величина и количество которых зависят от схемы выпрямления, количества фаз выпрямления, мощности преобразователей, параметров питающей сети, угла преобразователей. Искаженные кривые напряжений и токов высоковольтной рудничной питающей сети в процессе работы имеют периодический характер.

Критерием ЭМС преобразователей с питающей электрической сетью является качество электрической энергии в точке присоединения преобразователя к питающей сети в системах электроснабжения общего назначения или в точке присоединения промышленного объекта для промышленных систем электроснабжения. Качество электрической энергии (КЭ) определяется как степень соответствия характеристик электрической энергии в данной точке электрической системы совокупности нормированных показателей КЭ [97]. Основными показателями качества, характеризующими ЭМС в высоковольтных рудничных сетях с мощными тиристорными электроприводами, являются медленные изменения напряжения, колебания напряжения и фликер, несинусоидальность напряжения,

несимметрия напряжений в трехфазных системах, провалы напряжения и перенапряжения.

Медленные изменения напряжения электропитания (как правило, продолжительностью более 1 мин) обусловлены обычно изменениями нагрузки электрической сети [97]. Показателями КЭ, относящимися к медленным изменениям напряжения электропитания, являются отрицательное и положительное отклонения напряжения электропитания в точке передачи электрической энергии от номинального/согласованного значения, %:

$$\delta U_{(-)} = [(U_0 - U_{m(-)})/U_0] \cdot 100; \quad (1.2)$$

$$\delta U_{(+)} = [(U_{m(+)} - U_0)/U_0] \cdot 100, \quad (1.3)$$

где $U_{m(+)}$, $U_{m(-)}$ – значения напряжения электропитания, меньшие U_0 и большие U_0 соответственно, усредненные в интервале времени 10 мин в соответствии с требованиями ГОСТ 30804.4.30, подраз. 5.12; U_0 – напряжение, равное стандартному номинальному напряжению $U_{ном}$ или согласованному напряжению U_c .

Колебания напряжения электропитания (как правило, продолжительностью менее 1 мин), в том числе одиночные быстрые изменения напряжения обуславливают возникновение фликера. Одиночные быстрые изменения напряжения вызываются, в основном, резкими изменениями нагрузки в электроустановках потребителей, переключениями в системе либо неисправностями и характеризуются быстрым переходом среднеквадратического значения напряжения от одного установившегося значения к другому [97]. Поскольку в циклах работы электроприводов ПУ присутствуют динамические процессы составляющие 46–50 % от времени цикла, следовательно, в высоковольтной системе электроснабжения этих установок могут наблюдаться как медленные изменения напряжения, так и колебания напряжения и фликер.

Несинусоидальность напряжения характеризуется двумя составляющими – гармоническими составляющими напряжения и интергармоническими составляющими напряжения. Гармонические составляющие напряжения обусловлены нелинейными нагрузками потребителей, подключаемыми к электрическим сетям различного напряжения. Гармонические токи, протекающие в электрических се-

тах, создают падения напряжений на полных сопротивлениях электрических сетей. Гармонические токи, полные сопротивления электрических сетей и, следовательно, напряжения гармонических составляющих в точках передачи электрической энергии изменяются во времени [97].

Показателями КЭ, относящимися к гармоническим составляющим напряжения, являются [97]:

– значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения до 40-го порядка $K_{U(n)}$ в процентах напряжения основной гармонической составляющей в точке передачи электрической энергии, %:

$$K_{U(n)} = \frac{U_n}{U_1} \cdot 100, \quad (1.4)$$

где U_n – действующее значение напряжения на частоте n -й гармоники; U_1 – действующее значение напряжения на основной частоте.

– 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:

$$K_U = 100 \cdot \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_n^2}}{U_1}, \quad (1.5)$$

где U_n – действующее значение n -й гармонической составляющей напряжения, В; U_1 – действующее значение напряжения на основной частоте, В; n – порядок гармонической составляющей напряжения.

Уровень интергармонических составляющих напряжения электропитания увеличивается в связи с применением в электроустановках частотных преобразователей и другого управляющего оборудования [97].

Несимметрия трехфазной системы напряжений обусловлена несимметричными нагрузками потребителей электрической энергии или несимметрией элементов электрической сети [97]. Несимметрия в рассматриваемой системе элек-

троснабжения может наблюдаться в результате разброса технологических параметров тиристорных групп и при их несинхронной работе.

Провалы напряжения обычно происходят из-за неисправностей в электрических сетях или в электроустановках потребителей, а также при подключении мощной нагрузки. Провал напряжения, как правило, связан с возникновением и окончанием короткого замыкания или иного резкого возрастания тока в системе или электроустановке, подключенной к электрической сети. В соответствии с требованиями настоящего стандарта провал напряжения рассматривается как электромагнитная помеха, интенсивность которой определяется как напряжением, так и длительностью. Длительность провала напряжения может быть до 1 мин. Ввиду того, что электроприводы ПУ являются мощными электроприёмниками, то при их подключении, разгоне и торможении в высоковольтной питающей сети могут наблюдаться провалы напряжения.

Перенапряжения, как правило, вызываются переключениями и отключениями нагрузки. Перенапряжения могут возникать между фазными проводниками или между фазными и защитным проводниками. В зависимости от устройства заземления короткие замыкания на землю могут также приводить к возникновению перенапряжения между фазными и нейтральным проводниками. В соответствии с требованиями настоящего стандарта перенапряжение рассматривается как электромагнитная помеха, интенсивность которой определяется как напряжением, так и длительностью. Длительность перенапряжения может быть до 1 мин [97]. При переключении или отключении мощной нагрузки, которой являются тиристорные электроприводы, в высоковольтной системе электроснабжения рудничного предприятия могут возникать перенапряжения.

Кроме представленных показателей качества, к показателям ЭМС можно отнести дополнительные потери активной мощности и электроэнергии, обусловленные действием токов высших гармоник. Дополнительные потери мощности и электроэнергии – наиболее серьёзный негативный эффект, вызываемый высшими гармониками в элементах систем электроснабжения.

Гармоники тока в воздушных линиях электропередач приводят к дополни-

тельным потерям электроэнергии и напряжения. В случае кабельных линий гармоника напряжения повышают воздействие на диэлектрик пропорционально увеличению максимального значения амплитуды. Это, в свою очередь, увеличивает число повреждений кабеля и стоимость ремонта. В линиях сверхвысокого напряжения гармоника напряжения по той же причине (увеличение амплитуды) могут вызвать увеличение потерь на корону.

Гармоники напряжения вызывают в трансформаторах увеличение потерь на гистерезис, потерь, связанных с вихревыми токами в стали, и потерь в обмотках. Кроме того, сокращается срок службы изоляции. Увеличение потерь в обмотках трансформатора наиболее важно в случае преобразовательного трансформатора, так как наличие фильтра, присоединенного обычно к стороне переменного тока, не снижает гармоник тока в трансформаторе. Кроме того, наблюдаются локальные перегревы бака трансформатора. Важная составляющая воздействия гармоник на мощные трансформаторы состоит в циркуляции утроенного тока нулевой последовательности в обмотках, соединённых в треугольник, что может приводить к перегрузке.

Влияние несинусоидальности напряжения на промышленное электрооборудование выражается в сокращении срока его службы из-за ускоренного старения изоляции [30, 53, 96]. Высока вероятность нарушения нормальной работоспособности электрооборудования и выхода его из строя при низком качестве электроэнергии.

Потери от высших гармоник токов в системах электроснабжения могут составлять несколько процентов от технических потерь. В системах электроснабжения со значительной нелинейной нагрузкой, на крупных промышленных предприятиях такие потери могут достигать 10–15 % от основных потерь [25, 28, 31, 32, 98].

Неблагоприятные факторы, обусловленные несинусоидальными режимами работы систем электроснабжения с мощными тиристорными электроприводами, влияют на режимы работы всей системы, а также на потребителей электрической энергии в частности. Выявление несоответствия показателей ЭМС предьявляе-

мым требованиям осуществляется при проведении экспериментальных исследований, а также при имитационном моделировании. Результаты измерений и моделирования анализируются и сравниваются с требованиями норм для определения и оценки влияния несинусоидальных режимов на электрооборудование и систему электроснабжения.

Электромагнитная совместимость и качество электроэнергии тесно связаны с надёжностью электроснабжения [30, 96, 99], поскольку при несоответствии показателей ЭМС и КЭ требованиям норм и стандартов возрастает износ элементов систем электроснабжения и электрооборудования. Это приводит к ухудшению показателей надёжности функционирования электрооборудования, элементов сетей и технологических процессов производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии.

В связи с негативным влиянием гармоник на электротехнические системы в промышленно развитых странах придаётся большое значение мероприятиям по их подавлению.

Например, в США действует стандарт IEEE 519-1992, распространяющийся на электрические системы, содержащие электроприемники с нелинейными вольт-амперными характеристиками [100].

В РФ уровень воздействия высших гармоник в частности и электромагнитной совместимости в целом определен в действующих стандартах ГОСТ 32144-2013 и ГОСТ Р 51317.2.4-2000.

На международном уровне стандартизацией в области электротехники занимается Международная электротехническая комиссия (МЭК). В частности, вопросами ЭМС, в том числе разработкой стандартов по ограничению искажений напряжений сетей, занимается технический комитет ТК 77 МЭК «Электромагнитная совместимость», который был создан в 1973 г. Основная его задача – подготовка международных стандартов, касающихся проблем ЭМС электрического и электронного оборудования между собой и сетями электроснабжения.

В разных странах мира действуют стандарты аналогичные отечественным, регламентирующие уровень высших гармоник не только напряжения, но и тока в

питающей сети. Между зарубежными и отечественными стандартами существуют некоторые принципиальные отличия:

– В зарубежных стандартах вводится понятие суммарного коэффициента гармонических составляющих по току, который представляет собой отношение среднеквадратического значения суммы значений токов высших гармоник I_n к значению тока основной гармоники I_1 :

$$K_I = 100 \cdot \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} I_n^2}}{I_1}. \quad (1.6)$$

При этом его значения нормируются в зависимости от характеристик сети.

– Уровень нечетных гармоник тока нормируется в зависимости от отношения тока нагрузки и тока короткого замыкания для конкретного участка электрической сети.

– Требования, предъявляемые к уровню высших гармоник в сетях в западных странах, значительно жестче отечественных.

Электромагнитная совместимость технических средств (ТС) – это способность технического средства нормально функционировать с заданным качеством в заданной электромагнитной обстановке и не создавать недопустимых электромагнитных помех другим техническим средствам.

Электромагнитная обстановка определена как случайное электромагнитное воздействие, которое может вызвать в электротехническом устройстве или ТС нарушение нормального функционирования, отказ, повреждение или разрушение.

Уровень электромагнитной совместимости в системах электроснабжения определен как регламентированный уровень электромагнитной помехи, используемый в качестве опорного для координации между допустимым уровнем помех, вносимым техническими средствами (в данном случае мощными тиристорными электроприводами) потребителей (промышленных предприятий, рудника) электрических сетей, и уровнем помех, воспринимаемым техническими средствами, подключенными к электрической сети, без нарушения их нормального функционирования. Воздействие мощных тиристорных электроприводов на систему электроснабжения

троснабжения предприятия и других потребителей является причиной нарушения их нормального функционирования, ухудшения качества электрической энергии и общей электромагнитной обстановки.

Таким образом, тиристорные преобразователи, выполненные по 12-пульсной схеме выпрямления, используемые в качестве источников электрической энергии для мощных двигателей постоянного тока ПУ, являются главными источниками высших гармоник токов и напряжений в высоковольтных системах электроснабжения рудничных предприятий.

1.4. Методы и технические средства, способствующие компенсации высших гармонических составляющих токов и напряжений

В настоящее время в системах электроснабжения с нелинейными потребителями для компенсации ВГ токов и напряжений основное распространение получили организационные, технические мероприятия и мероприятия по совершенствованию систем расчетного и технического учета электроэнергии, а также различного вида технические средства (рисунок 1.9) [8, 14, 31, 32, 39, 55, 67, 101, 103, 123].

Для компенсации ВГ токов и напряжений, для улучшения качества электроэнергии и электромагнитной обстановки основное распространение получили следующие виды технических средств: пассивные фильтры гармоник (ПФГ), активные фильтры гармоник (АФГ), гибридные фильтры (ГФ или активно-пассивные фильтры), пассивные фильтры специальной настройки (ПФСН) [14, 15, 16, 23, 35, 37, 55, 57, 76, 101].

Одним из наиболее распространенных и удобных технических средств снижения значений ВГ составляющих токов и напряжений являются пассивные фильтры, которые, несмотря на появление активных фильтров, остаются востребованными [14–16, 35, 37, 76, 78, 82–85], поскольку значительно дешевле активных. Это наиболее эффективное средство для улучшения качества электроэнергии. Пассивные фильтры могут устанавливаться непосредственно вблизи нелинейных нагрузок для компенсации токов ВГ, которые они генерируют, или для

централизованного применения в сети с распределенными нелинейными нагрузками. Пассивные фильтры также используются в составе гибридных схем, где они позволяют сократить число ВГ [35, 57, 102]. При этом они выполняют две основные функции: на основной частоте генерируют реактивную мощность, а на настраиваемой гармонике для тока соответствующей гармоники создают путь с наименьшим сопротивлением, не давая ему возможности растекаться по сети и вызывать искажения формы кривой напряжения. Помимо ослабления высших гармоник токов и напряжений силовые фильтры выполняют функции компенсации реактивной мощности, регулирования напряжения в точке подключения [14, 77].



Рисунок 1.9. Классификация методов и технических средств для компенсации ВГ токов и напряжений

Пассивные фильтры гармоник (ПФГ) имеют невысокую стоимость, про-

стую конструкцию, не требуют регулярного обслуживания, выполняют одновременно функции ослабления гармоник и коррекции коэффициента мощности. Основными их достоинствами являются простота и экономичность. Однако ПФГ являются статическими устройствами. Их эффективность снижается при изменении гармонического состава токов и напряжений, а также параметров сети. Другой недостаток – возможность возникновения резонанса в параллельном колебательном контуре, образуемом фильтром и индуктивностью и емкостью питающей сети, на частотах, близких к частотам высших гармоник. Пассивные фильтры гармоник являются одним из основных видов фильтрокомпенсирующих устройств и представляют собой пассивную частотно-селективную цепь, обеспечивающую ослабление высших гармоник, генерируемых нелинейной нагрузкой.

Пассивные фильтры отличаются разнообразием конфигураций и реализуемых частотных характеристик. Для обеспечения ЭМС в высоковольтных рудничных сетях с мощными тиристорными электроприводами могут быть применимы трехфазные трехпроводные фильтры различных порядков, преимущественно с параллельным включением, настроенные на одну или несколько частот высших гармоник.

Современные активные системы коррекции формы кривых тока и напряжения, выполненные на базе параллельных активных фильтров, лишены таких недостатков, как провоцирование резонансных явлений в питающей сети, сложность настройки на частоту фильтрации, ограниченное число гармоник. Они способны эффективно компенсировать реактивную мощность и высшие гармоники тока и напряжения сети (от 2-й до 40-й) в режиме реального времени с высоким быстродействием [1, 2, 55, 58].

Активный фильтр – это преобразователь переменного/постоянного тока с ёмкостным или индуктивным накопителем электрической энергии на стороне постоянного тока, формирующий методами импульсной модуляции усреднённое значение тока (напряжения), равное разности нелинейного тока или напряжения и синусоидального тока (напряжения) его основной гармоники. Наибольшее практическое применение получили схемы активных фильтров гармоник с ёмкостным

накопителем благодаря их более высокому быстродействию и лучшим технико-экономическим показателям. Преимущество схем с индуктивным накопителем проявляется при использовании сверхпроводящих индуктивных накопителей в тех случаях, когда это необходимо для компенсации реактивной мощности или обеспечения резерва электроэнергии при исчезновении напряжения сети.

В зависимости от особенностей применения и для решения различных электрических проблем активные фильтры имеют следующие основные варианты исполнения: параллельного, последовательного, параллельно-последовательного типа.

Активный параллельный фильтр электроэнергии (АПФЭ) с системой контроля постоянного напряжения на обкладках накопительной ёмкости имеет топологию, похожую на статический компенсатор (СТАТКОМ), используемый для компенсации реактивной мощности в силовых передающих системах электропитания. Но, в отличие от СТАТКОМа, АПФЭ компенсирует гармонический ток нагрузки, инжектируя ток гармонической компенсации. В этом случае АПФЭ работает как источник тока, выдающий гармонические составляющие, равные по величине, вырабатываемые нагрузкой, но сдвинутые относительно них по фазе на 180° .

Последовательный АФ инжектирует компоненты напряжения последовательно с питающим напряжением и, таким образом, может рассматриваться как управляемый источник напряжения, компенсируя провалы и скачки напряжения на стороне нагрузки. Во многих случаях эти АФ работают в гибридных системах совместно с пассивными LC фильтрами. Если пассивные LC цепочки подключены в параллель к нагрузке, то последовательный АФ работает в качестве гармонического изолятора, заставляя основную часть гармонического тока нагрузки течь сквозь пассивные LC цепочки, исключая питающую сеть. Основное преимущество этого схемного решения в том, что мощность АФ мала по сравнению с мощностью нагрузки и составляет около 5 %.

Активный последовательно-параллельный фильтр является одним из современных направлений развития технологии активного фильтра. Как видно из

названия, это комбинация последовательного и параллельного АФ. Параллельный АФ располагается на стороне нагрузки, в то же время последовательный АФ, расположенный со стороны питающей сети, выступает в качестве блокирующего фильтра гармоник сети. Данное схемное решение называется «универсальный кондиционер качества электроэнергии». Последовательная часть компенсирует гармоники питающего напряжения, и дисбаланс напряжения, действует как гармонический блокировочный фильтр и демпфирует колебания в питающей системе. Параллельная часть компенсирует гармонический ток нагрузки, реактивную мощность и дисбаланс токов нагрузки.

Кроме применения технических средств борьбы с несинусоидальными режимами и для компенсации ВГ с целью обеспечения ЭМС в рудничных высоковольтных системах электроснабжения могут проводиться мероприятия по снижению дополнительных потерь мощности и электроэнергии от действия токов ВГ. Общие мероприятия по снижению потерь мощности подразделяют на три группы: организационные, технические и мероприятия по совершенствованию систем расчетного и технического учета электроэнергии.

К организационным относят мероприятия по совершенствованию эксплуатационного обслуживания электрических сетей и оптимизации рабочих схем сетей и режимов их работы. К техническим мероприятиям относят мероприятия по реконструкции, модернизации или строительству сетей, замене или установке дополнительного оборудования. Совершенствование систем технического и расчетного учета электроэнергии позволяет обеспечить расчеты по выбору мероприятий по снижению потерь более точной информацией и увеличить эффективность последних [103].

Для снижения дополнительных потерь мощности и электроэнергии от действия токов ВГ могут быть эффективными мероприятия всех трёх групп, но для высоковольтных рудничных сетей с мощными нелинейными электроприемниками наиболее применимыми являются:

- увеличение мощностей силовых и согласующих трансформаторов;
- увеличение сечений проводников системы электроснабжения;

- подключение к системе с большей мощностью КЗ;
- оптимизация режима питающей сети по реактивной мощности, напряжению и коэффициентам трансформации (влияние РПН трансформаторов на уровень потерь);
- установка компенсирующих устройств и автоматическое регулирование их мощности;
- снижение норм расхода мощности и электроэнергии на единицу добываемой руды;
- регулирование суточного графика нагрузки и снижение пиков в часы максимума (перевод энергоемких подъемных установок, работающих периодически, с часов максимума на другие часы работы);
- оптимизация режимов работы высоковольтной системы электроснабжения по реактивной мощности, напряжению и коэффициентам трансформации с учетом специфики её работы;
- установка пассивных, активных или гибридных фильтрокомпенсирующих устройств.

Таким образом, существует большое количество технических средств и мероприятий по снижению действия высших гармоник. Одним из наиболее удобных и распространенных средств являются пассивные фильтры гармоник. Выбор конкретных типов фильтров, определение их параметров для снижения негативного действия высших гармоник в высоковольтной рудничной сети с мощными тиристорными электроприводами на примере Яковлевского рудника выполняется в последующих главах с учетом результатов экспериментальных исследований, имитационного моделирования и аналитических расчетов.

Успешное решение проблемы ЭМС преобразователей с высоковольтной питающей электрической сетью в значительной степени определяется выбором рациональной комбинации методов и средств, демпфирующих негативное воздействие таких мощных тиристорных преобразователей на питающую сеть.

Выводы

1. Высоковольтные системы электроснабжения рудничных предприятий имеют ряд особенностей построения, связанных с технологическим процессом добычи руды, сосредоточенностью энергоёмкого электрооборудования, циклическим характером нагрузки при наличии в циклах работы динамических процессов, составляющих 46–50 % от времени общего цикла. К основным особенностям систем электроснабжения рудников с точки зрения ЭМС и потерь мощности и электроэнергии следует отнести наличие мощных нелинейных электроприёмников – тиристорных электроприводов, которые являются причиной генерирования в высоковольтную рудничную сеть ВГ токов и напряжений, а также создающих несинусоидальные динамические режимы работы.

2. Несинусоидальные режимы работы в высоковольтных рудничных системах электроснабжения, вызванные мощными нелинейными электроприёмниками, приводят к значительным негативным последствиям, основными из которых являются ускоренный износ и выход из строя электрооборудования и сетей, дополнительные потери мощности и электроэнергии в элементах систем электроснабжения рудников.

3. Одним из наиболее распространенных и удобных технических средств компенсации ВГ составляющих токов и напряжений являются пассивные фильтры, выбор и определение параметров которых должны осуществляться с учетом особенностей системы электроснабжения, режимов работы технологического оборудования, графиков электрических нагрузок, значений величин токов искажения, затрат на капитальные вложения и издержек.

ГЛАВА 2. ОЦЕНКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ В ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ РУДНИЧНОЙ СЕТИ НА ПРИМЕРЕ ЯКОВЛЕВСКОГО РУДНИКА

Во второй главе выявлены особенности электромагнитной обстановки в высоковольтной рудничной сети с мощными тиристорными электроприводами с нелинейными вольтамперными характеристиками с учетом динамических режимов работы ПУ. Оценка показателей ЭМС выполнена при помощи экспериментальных исследований, имитационного моделирования в системе Matlab с пакетом расширений Simulink, а также на основании аналитических расчетов.

2.1. Экспериментальная оценка электромагнитной обстановки в высоковольтных рудничных сетях

Целью проведения экспериментов являлось определение в течение трех характерных суток значений параметров режимов и коэффициентов, характеризующих ЭМС на стороне высшего напряжения распределительной подстанции РП-6 кВ здания подъемных машин. Измерялись следующие основные параметры: U_1 – значение (действующее) основной гармонической составляющей напряжения, В; I – действующее значение несинусоидального фазного тока, А; φ – фазовый угол между напряжением и током основной гармонической составляющей, град.; P – активная электрическая мощность, Вт; Q – реактивная электрическая мощность, вар; K_U – суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения, %; $K_{U(n)}$ – коэффициент n -й гармонической составляющей напряжения, %; K_I – суммарный коэффициент гармонических составляющих тока, %; $K_{I(n)}$ – коэффициент n -й гармонической составляющей тока, %; P_n и Q_n – соответственно активная и реактивная электрическая мощность n -й гармоники, Вт и вар.

Измерения производились при помощи приборов «Энергомонитор - 3.3Т1», анализатора параметров электросетей С.А.8335. Места установки приборов представлены на рисунке 2.1.

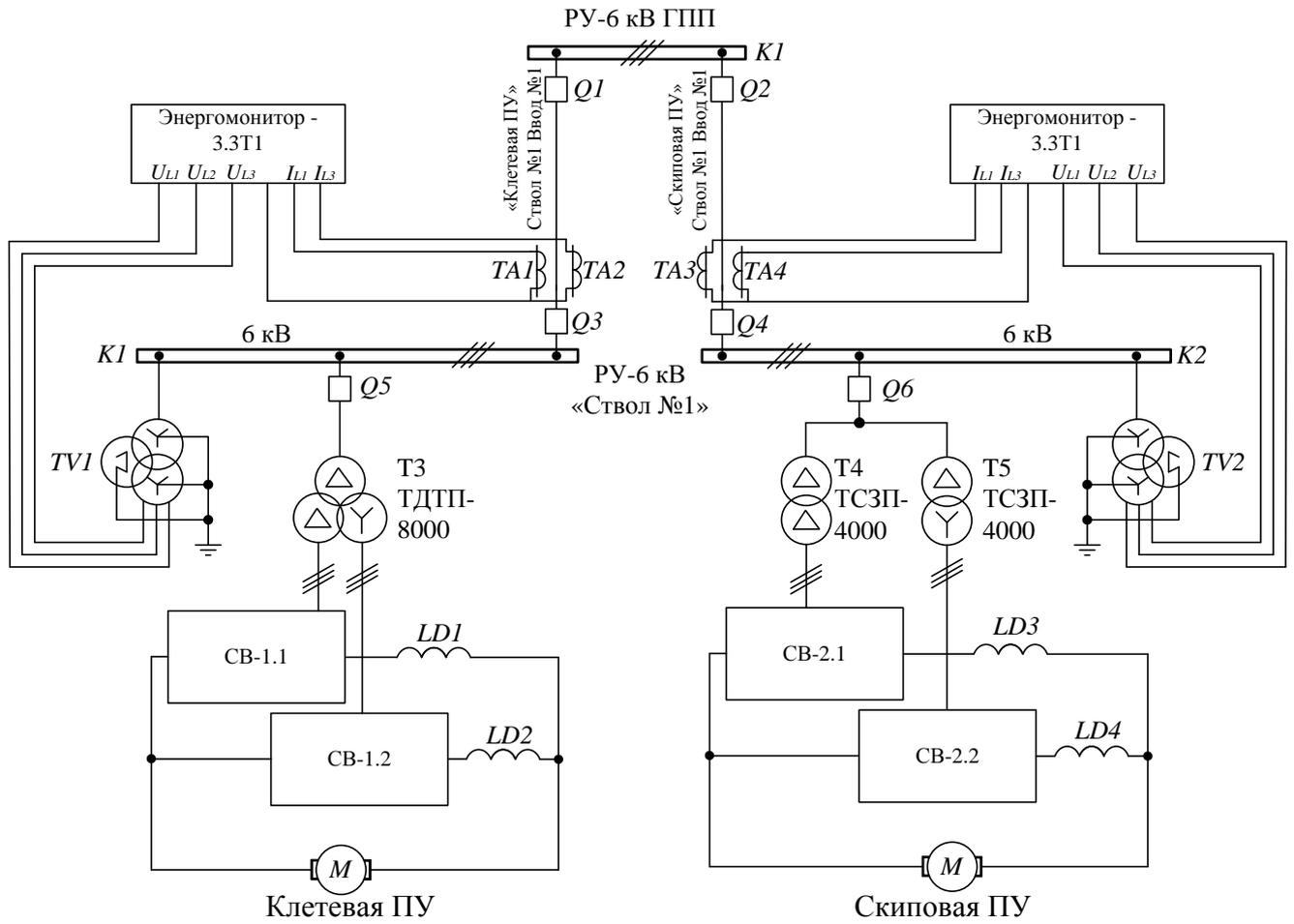


Рисунок 2.1. Места установки приборов в высоковольтной рудничной сети

Прибор «Энергомонитор - 3.3Т1» (заводской номер № 2202) является утвержденным Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии типом средств измерений (регистрационный номер № 39952-08). Это многофункциональное устройство, предназначенное для измерения и регистрации основных показателей качества электроэнергии и показателей электромагнитной совместимости [104]. Характеристики данного прибора представлены в таблице 2.1. Прибор анализатор параметров электросетей С.А.8335 (заводской номер № 00213260) является утвержденным Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии типом средств измерений (регистрационный номер № 28710-09).

Таблица 2.1 – Характеристики прибора «Энергомонитор - 3.3Т1»

| Измеряемые величины | Диапазон измерений | Основная погрешность измерений | |
|--|--|---|--------------------------------------|
| | | Прибор с БТТ | Прибор с клещами повышенной точности |
| Переменное напряжение, В | от 1 до 360 | $\pm[0,1+0,01((U_H/U)-1)]$, % | |
| Переменный ток, А | от 5 мА до 60 А (БТТ $I_H = 0,5; 5; 50$ А) | $\pm[0,1+0,01((I_H/I)-1)]$, % | – |
| | от 50 мА до 4500 А (Клещи $I_H = 10; 100; 1000; 300; 3000$ А) | – | $\pm[0,5+0,05((I_H/I)-1)]$, % |
| Фазовый угол между фазными напряжениями первых гармоник, град | от 0° до 360° | Абсолютная: 0,1° | |
| Фазовый угол между напряжением и током первой гармоники одной фазы | от 0° до 360° | Абсолютная | |
| | | 0,2° | 0,5° |
| Активная электрическая мощность, Вт | от 0,01 U_H до 1,5 U_H , $K_p=1$ | Относительная | |
| | 0,1 $I_H \leq I < 1,5I_H$ | 0,1% | 0,5% |
| | 0,01 $I_H \leq I < 0,1I_H$ | 0,2% | – |
| Реактивная электрическая мощность, вар | от 0,05 $I_H \cdot U_H$ до 1,5 $I_H \cdot 1,2U_H$ | Относительная | |
| | $K_Q=1$ | 0,3% | 1,0% |
| | $K_Q=0,45L \dots 0 \dots -0,45C$ | 0,5% | 2,0% |
| Коэффициенты искажения синусоидальности кривой напряжения и n-й гармонической составляющей напряжения ($n = 2-40$) | от 0 до 49,9 % | Абсолютная: 0,05 % (Коэффициент < 1,0) | |
| | | Относительная: 5,0 % (Коэффициент $\geq 1,0$) | |
| Коэффициенты искажения синусоидальности тока и n-й гармонической составляющей тока ($n = 2-40$) | от 0 до 49,9 % | Абсолютная: 0,1 (Коэффициент < 1,0) | |
| | | Относительная: 10,0 % (Коэффициент $\geq 1,0$) | |

Прибор дает быструю оценку эксплуатационных параметров сети, мгновенно отображает основные характеристики трехфазной сети и производит контроль изменений различных параметров сети в течение длительного времени. Могут измеряться значения токов и напряжений, их гармонический состав. Параметры прибора С.А 8335 представлены в таблице 2.2 [105]. Приборы «Энергомонитор - 3.3Т1» и С.А.8335 имеют свидетельства о поверке соответственно № 008014 и № 008013 от «28» апреля 2016 г. Копии свидетельств о поверке и об утверждении средства измерений представлены в приложении А.

Таблица 2.2 – Характеристики анализатора параметров электросетей С.А 8335

| Измеряемые величины | Диапазон измерений | Пределы допускаемых основных погрешностей |
|--|------------------------|--|
| Напряжение постоянного и переменного тока, В: фазовое линейное | 10...1000 10...1000 | $\pm 0,8\% + 1 \text{ В}$ |
| Коэффициент амплитуды (пик-фактор) | 1...3,99 4...9,99 | $\pm 1\% + 2 \text{ е.м.р.}$ $\pm 5\% + 2 \text{ е.м.р.}$ |
| Сила переменного тока, А | 10...6500 | $\pm 0,5 + 1 \text{ А}$ |
| Сила переменного тока, пиковое значение, А | 10...9150 | $\pm (1\% + 1 \text{ А})$ |
| Сила постоянного тока, А (с клещами РАС) | 1...1200 | $\pm 1\% + 1 \text{ А}$ |
| Частота, Гц | 49...60 | $\pm 1 \text{ е.м.р.}$ |
| Активная мощность, кВт | 0...9999 | $\pm 1,5\% + 10 \text{ е.м.р. } (0,5 \leq \cos\varphi \leq 0,8)$ |
| Реактивная мощность, квар | 0...9999 | $\pm 2,5\% + 20 \text{ е.м.р. } (0,2 \leq \cos\varphi \leq 0,5)$ |
| Полная мощность, кВА | 0...9999 | $\pm 1\% + 10 \text{ е.м.р.}$ |
| Коэффициент мощности | -1...1 | $\pm 1,5\% (\cos\varphi > 0,5)$ $\pm 1,5\% + 2 \text{ е.м.р.}$ $(0,2 \leq \cos\varphi \leq 0,5)$ |
| Активная энергия, МВт·ч | 0...9999 | $\pm 1,5\% + 10 \text{ е.м.р. } (0,5 \leq \cos\varphi \leq 0,8)$ |
| Реактивная энергия, Мвар·ч | 0...9999 | $\pm 2,5\% + 20 \text{ е.м.р. } (0,2 \leq \cos\varphi \leq 0,5)$ |
| Полная энергия, МВА·ч | 0...9999 | $\pm 1\% + 10 \text{ е.м.р.}$ |
| Коэффициент гармоник, % | 0...999,9 | $\pm 1\% + 5 \text{ е.м.р.}$ |
| Коэффициент нелинейных искажений, % | 0...999,9 | $\pm 1\% + 10 \text{ е.м.р.}$ |

Для измерения параметров в высоковольтных системах электроснабжения клетевой и скиповой ПУ приборы подключались к вторичным обмоткам трансформаторов тока вводных цепей и трансформаторов напряжения РУ-6 кВ. Коэффициенты трансформации измерительных трансформаторов тока вводных цепей $K_{\text{трТА}} = 800/5$, коэффициенты трансформации измерительных трансформаторов напряжения секций шин $K_{\text{трТВ}} = 6000/100$. Подключение приборов осуществлялось к трехфазной трехпроводной сети с помощью токоизмерительных клещей и прижимных контактов.

Измерения проводились в соответствии с программой экспериментальных исследований (приложение 1), утвержденной главными специалистами предприятия. Программа составлена в соответствии с требованиями стандарта ГОСТ 30804.4.7 – 2013 [106].

Особенность экспериментальных исследований заключалась в том, что они проведены в действующей системе электроснабжения Яковлевского рудника. Из-

мерения производились непрерывно в течение трех суток в соответствии с требованиями стандарта ГОСТ 30804.4.7 – 2013 [106].

Фрагменты результатов измерений значений параметров режимов и показателей ЭМС приведены соответственно в таблицах 2.3 и 2.4. Результаты измерений с протоколами, утвержденными специалистами предприятия, представлены в приложении А.

Таблица 2.3 – Параметры режимов и показателей ЭМС по напряжению

| Время | U, В | I, А | K _U , % | K _{U(11)} , % | K _{U(13)} , % | K _{U(23)} , % | K _{U(25)} , % | K _{U(35)} , % | K _{U(37)} , % | P, Вт |
|-------------------------------------|---------|--------|--------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|---------|
| Скиповая ПУ (Энергомонитор - 3.3Т1) | | | | | | | | | | |
| 17:33 | 6233,88 | 311,44 | 9,67 | 4,09 | 3,64 | 3,42 | 3,55 | 3,12 | 4,11 | 554 008 |
| 17:36 | 6185,46 | 366,88 | 11,07 | 4,91 | 4,42 | 4,02 | 4,22 | 3,46 | 4,65 | 788 777 |
| 17:44 | 6216,3 | 367,02 | 11,1 | 4,89 | 4,3 | 4,11 | 4,19 | 3,69 | 4,79 | 762 978 |
| 17:50 | 6218,1 | 352,93 | 10,54 | 4,69 | 4,11 | 3,9 | 3,96 | 3,48 | 4,46 | 765 655 |
| 17:55 | 6209,64 | 332,93 | 10,26 | 4,49 | 3,98 | 3,75 | 3,78 | 3,34 | 4,21 | 762 537 |
| 18:14 | 6211,02 | 373,47 | 11,32 | 4,99 | 4,47 | 4,1 | 4,33 | 3,56 | 4,81 | 498 397 |
| 18:23 | 6247,02 | 350,22 | 10,18 | 4,64 | 4,02 | 3,84 | 3,8 | 3,39 | 4,11 | 554 008 |
| 18:26 | 6245,04 | 365,12 | 10,7 | 4,85 | 4,22 | 3,99 | 4,02 | 3,51 | 4,35 | 788 777 |
| 18:37 | 6270,12 | 323,76 | 9,98 | 4,23 | 3,84 | 3,45 | 3,71 | 3,03 | 4,18 | 598 960 |
| 18:41 | 6274,02 | 370,94 | 11 | 4,95 | 4,33 | 4,09 | 4,15 | 3,66 | 4,56 | 765 655 |
| Клетевая ПУ (Энергомонитор - 3.3Т1) | | | | | | | | | | |
| 17:43:57 | 6164,04 | 287,03 | 9,66 | 4,9 | 7,22 | 2,72 | 1,8 | 1,18 | 1,25 | 715 201 |
| 17:44:00 | 6166,44 | 274,25 | 8,45 | 4,41 | 6,17 | 2,4 | 1,65 | 1,05 | 1,13 | 683 059 |
| 17:44:03 | 6167,16 | 274,51 | 8,50 | 4,37 | 6,23 | 2,42 | 1,64 | 1,08 | 1,16 | 681 749 |
| 17:44:06 | 6167,82 | 270,22 | 7,85 | 4,07 | 5,68 | 2,25 | 1,56 | 1 | 1,12 | 667 876 |
| 17:44:09 | 6167,7 | 272,34 | 8,02 | 4,19 | 5,81 | 2,3 | 1,57 | 1 | 1,1 | 674 168 |
| 17:44:12 | 6147,18 | 447,83 | 17,44 | 9,32 | 12,31 | 5,42 | 3,97 | 2,2 | 2,1 | 891 677 |
| 17:44:15 | 6157,56 | 435,17 | 17,87 | 10,07 | 12,24 | 5,61 | 4,13 | 2 | 2,08 | 518 929 |
| 17:44:18 | 6168,72 | 408,48 | 16,67 | 9,94 | 10,94 | 5,18 | 3,9 | 1,72 | 1,96 | 182 919 |
| 17:44:21 | 6188,82 | 310,80 | 11,95 | 7,29 | 7,73 | 3,58 | 2,67 | 1,18 | 1,64 | 213 389 |
| 17:44:27 | 6200,7 | 229,18 | 6,26 | 3,91 | 3,84 | 1,8 | 1,32 | 0,64 | 1,15 | 169 923 |

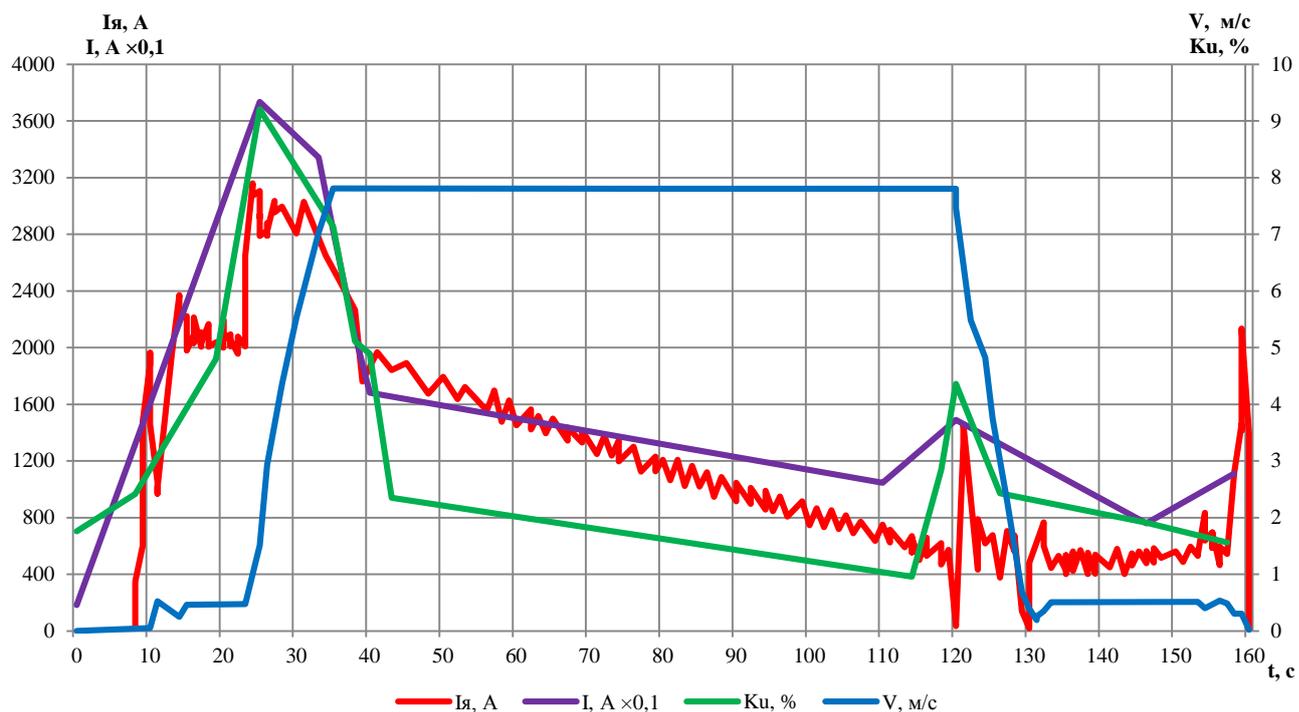
Таблица 2.4 – Параметры режимов и показателей ЭМС по току

| Время | I , А | K_U , % | $I_{(1)}$, А | $K_{I(1)}$, % | $K_{I(13)}$, % | $K_{I(23)}$, % | $K_{I(25)}$, % | $K_{I(35)}$, % | $K_{I(37)}$, % |
|-------------------------------------|---------|-----------|---------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Скиповая ПУ (Энергомонитор - 3.3Т1) | | | | | | | | | |
| 17:33 | 311,44 | 8,58 | 308,51 | 5,57 | 4,22 | 2,14 | 2,05 | 1,03 | 1,07 |
| 17:36 | 366,88 | 8,09 | 366,10 | 5,68 | 4,46 | 2,03 | 2,18 | 0,91 | 1,18 |
| 17:44 | 367,02 | 8,06 | 364,48 | 5,71 | 4,35 | 2,1 | 2,15 | 1,01 | 1,2 |
| 17:50 | 352,93 | 8,02 | 351,12 | 5,7 | 4,33 | 2,09 | 2,13 | 0,97 | 1,15 |
| 17:55 | 332,93 | 8,57 | 329,57 | 5,64 | 4,3 | 2,15 | 2,04 | 1,02 | 1,01 |
| 18:14 | 373,47 | 8,15 | 372,40 | 5,73 | 4,46 | 2,08 | 2,2 | 0,95 | 1,21 |
| 18:23 | 350,22 | 7,95 | 348,19 | 5,68 | 4,28 | 2,06 | 2,07 | 0,95 | 1,12 |
| 18:26 | 365,12 | 8,03 | 363,41 | 5,71 | 4,37 | 2,07 | 2,12 | 0,93 | 1,1 |
| 18:34 | 323,76 | 9,92 | 269,26 | 5,56 | 4,28 | 2,26 | 1,97 | 1,1 | 0,81 |
| 18:37 | 370,94 | 8,81 | 321,04 | 5,51 | 4,35 | 2,06 | 2,08 | 0,95 | 1,02 |
| 18:41 | 311,44 | 8,1 | 369,86 | 5,76 | 4,4 | 2,1 | 2,14 | 0,97 | 1,15 |
| Клетевая ПУ (Энергомонитор - 3.3Т1) | | | | | | | | | |
| 17:43:57 | 287,03 | 7 | 288,46 | 5,57 | 1,58 | 2,08 | 0,9 | 0,96 | 0,75 |
| 17:44:00 | 274,25 | 6,64 | 273,11 | 5,34 | 1,37 | 1,97 | 0,84 | 0,91 | 0,73 |
| 17:44:03 | 274,51 | 6,68 | 273,97 | 5,36 | 1,37 | 1,96 | 0,84 | 0,89 | 0,74 |
| 17:44:06 | 270,22 | 6,48 | 266,05 | 5,23 | 1,25 | 1,9 | 0,81 | 0,86 | 0,72 |
| 17:44:09 | 272,34 | 6,49 | 267,09 | 5,24 | 1,28 | 1,91 | 0,81 | 0,87 | 0,71 |
| 17:44:12 | 447,83 | 9,21 | 439,80 | 7,1 | 2,69 | 2,85 | 1,04 | 1,32 | 0,81 |
| 17:44:15 | 435,17 | 9,37 | 438,84 | 7,18 | 2,83 | 2,92 | 1,08 | 1,38 | 0,81 |
| 17:44:18 | 408,48 | 9,51 | 409,92 | 7,1 | 2,79 | 2,89 | 1,1 | 1,38 | 0,85 |
| 17:44:21 | 310,80 | 8,53 | 323,47 | 6,28 | 2,2 | 2,45 | 1,04 | 1,17 | 0,86 |
| 17:44:27 | 229,18 | 6,75 | 229,12 | 4,93 | 1,3 | 1,74 | 0,86 | 0,81 | 0,74 |

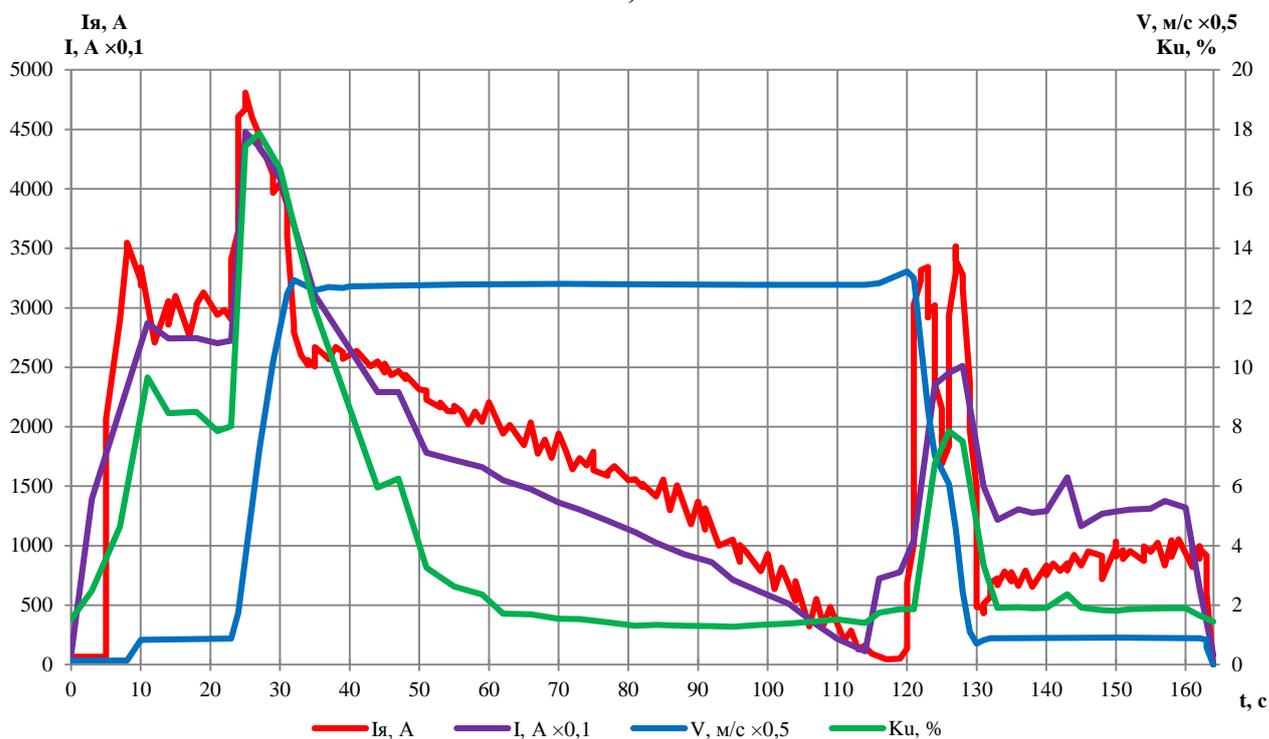
Примечание. В таблицах приняты следующие обозначения: U – действующее значение линейного несинусоидального напряжения, В; I – действующее значение несинусоидального фазного тока, А; $I_{(1)}$ – действующее значение несинусоидального фазного тока основной гармоники, А; K_U – суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения, %; $K_{U(n)}$ – коэффициент n -й гармонической составляющей напряжения, %; K_I – суммарный коэффициент гармонических составляющих тока, %; $K_{I(n)}$ – коэффициент n -й гармонической составляющей тока, %; P – активная мощность фазы, Вт.

На основании результатов экспериментальных исследований построены графики зависимостей изменения вводного и якорного токов, скорости с наложе-

нием суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения за время одного цикла работы ПУ (рисунок 2.2).



а)



б)

Рисунок 2.2. Графики изменения вводного и якорного токов, скорости с наложением суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения за цикл:

а – для скиповой ПУ; *б* – для клетевой ПУ

Как следует из рисунка 2.2, значения вводного тока коррелируют со значениями тока якоря ДПТ, и при увеличении тока в якорной цепи возрастают искажения синусоидальности вводного тока и питающего напряжения. Степень искажения зависит от динамики процесса. Увеличение тока на вводе схемы электропитания на участке торможения и дотягивания объясняется работой вспомогательного оборудования.

На рисунке 2.3 представлены спектры ВГ токов и напряжений в высоковольтной сети скиповой и клетевой ПУ.

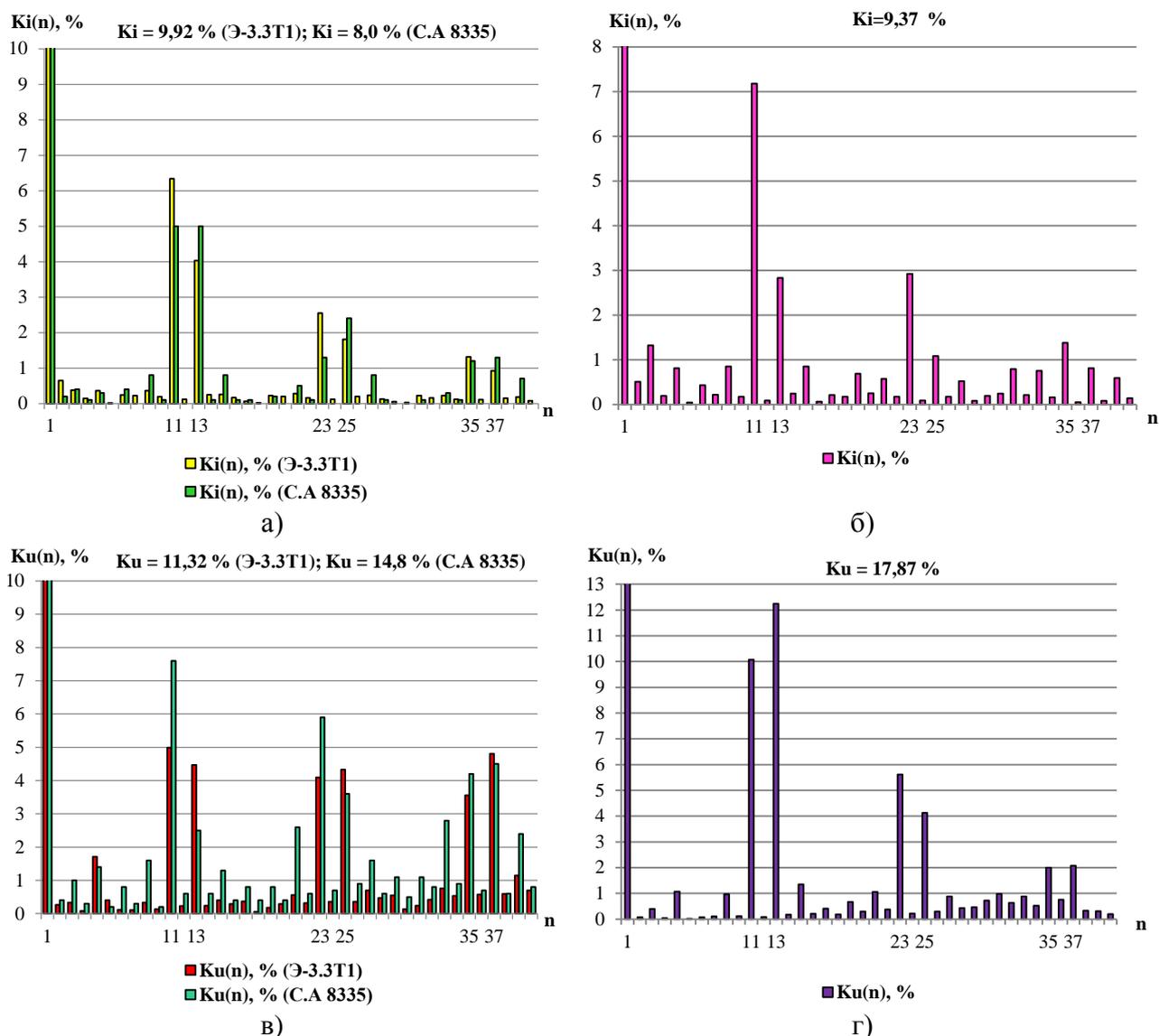


Рисунок 2.3. Спектры гармоник тока (а, б) и напряжения (в, г) питающей сети:

а, в – скиповой ПУ; б, г – клетевой ПУ

Как следует из рисунка 2.3, максимальные значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих тока и напряжения соответственно состави-

ли:

Энергомонитор - 3.3Т1:

- скиповая ПУ: $K_I = 9,92 \%$; $K_U = 11,32 \%$;
- клетевая ПУ: $K_I = 9,37 \%$; $K_U = 17,87 \%$;

С.А 8335:

- скиповая ПУ: $K_I = 8,0 \%$; $K_U = 14,8 \%$ (С.А 8335).

Значения коэффициентов 11, 13, 23, 25, 35 и 37-й гармонических составляющих напряжения соответственно составили:

Энергомонитор - 3.3Т1:

- скиповая ПУ: $K_{U(11)} = 4,99 \%$, $K_{U(13)} = 4,47 \%$, $K_{U(23)} = 4,11 \%$, $K_{U(25)} = 4,22 \%$, $K_{U(35)} = 3,69 \%$, $K_{U(37)} = 4,81 \%$;
- клетевая ПУ: $K_{U(11)} = 10,07 \%$, $K_{U(13)} = 12,24 \%$, $K_{U(23)} = 5,61 \%$; $K_{U(25)} = 4,13 \%$; $K_{U(35)} = 2,0 \%$; $K_{U(37)} = 2,08 \%$;

С.А 8335:

- скиповая ПУ: $K_{U(11)} = 7,6 \%$, $K_{U(13)} = 2,5 \%$, $K_{U(23)} = 5,9 \%$, $K_{U(25)} = 3,6 \%$, $K_{U(35)} = 4,2 \%$, $K_{U(37)} = 4,5 \%$.

Значения коэффициентов 11, 13, 23, 25, 35 и 37-й гармонических составляющих тока соответственно составили:

Энергомонитор - 3.3Т1:

- скиповая ПУ: $K_{I(11)} = 5,56 \%$, $K_{I(13)} = 4,28 \%$, $K_{I(23)} = 2,26 \%$, $K_{I(25)} = 1,97 \%$, $K_{I(35)} = 1,1 \%$, $K_{I(37)} = 0,81 \%$;
- клетевая ПУ: $K_{I(11)} = 7,18 \%$, $K_{I(13)} = 2,83 \%$, $K_{I(23)} = 2,92 \%$, $K_{I(25)} = 1,08 \%$, $K_{I(35)} = 1,38 \%$, $K_{I(37)} = 0,81 \%$;

С.А 8335:

- скиповая ПУ: $K_{I(11)} = 5,0 \%$, $K_{I(13)} = 5,0 \%$, $K_{I(23)} = 1,3 \%$, $K_{I(25)} = 2,4 \%$, $K_{I(35)} = 1,2 \%$, $K_{I(37)} = 1,3 \%$.

Результаты экспериментов показывают, что уровень неканонических и интергармоник значительно ниже уровня канонических гармоник, начиная с 11-й. В литературе [8] указывается на естественное снижение уровня 5-й и 7-й гармоник согласующими трансформаторами. В настоящее время в системах управления

электроприводами ПУ используются контроллеры, позволяющие в опережающем режиме отключать электроприводы при нарушении несимметрии фаз. Так как источником ВГ токов и напряжений является мощный тиристорный преобразователь и несимметрия системы исключается условиями работы ПУ, то отсутствуют физические предпосылки генерирования 3-ей гармоники в сеть.

Как следует из результатов экспериментальных исследований, в высоковольтной рудничной сети присутствуют высшие гармонические составляющие токов и напряжений, при этом их гармонические ряды, измеренные различными приборами, имеют схожую картину [107–109].

Достоверность результатов экспериментальных исследований подтверждена оценкой и исключением систематических погрешностей на основании методики обработки результатов измерений в соответствии с ГОСТ Р 8.736–2011 при доверительной вероятности $P = 0,95$ [110].

Обработка результатов измерений проведена для набора из 24 максимальных (пиковых) значений суммарных коэффициентов гармонических составляющих по току и напряжению, по следующему алгоритму:

1. Результаты измерения K_I и K_U представлены в таблице 2.5.
2. Определены средние значения из 24 измерений:

$$\overline{K_{I(U)}} = \sum_{i=1}^n K_{I(U)_i} / n. \quad (2.1)$$

3. Рассчитана погрешность отдельного измерения:

$$\Delta K_{I(U)_i} = \overline{K_{I(U)}} - K_{I(U)_i}. \quad (2.2)$$

4. Определены значения квадратов погрешностей отдельных измерений:

$$(\Delta K_{I(U)_i})^2. \quad (2.3)$$

5. Выполнен расчет среднего квадратичного отклонения:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta K_{I(U)_i})^2}{(n-1)}}. \quad (2.4)$$

6. При количестве измерений $n = 24$ нормальность их распределения проверяется с помощью составного критерия 1 и 2 [110].

Критерий 1. Результаты измерений в ряду считаются распределенными нормально, если $d_{1-q/2} < \tilde{d} \leq d_{q/2}$. Вычисляется отношение \tilde{d} :

$$\tilde{d} = \frac{\sum_{i=1}^n |K_{I(U)_i} - \overline{K_{I(U)}}|}{n \cdot S^*}, \quad (2.5)$$

где S^* – смещенное среднее квадратичное отклонение, $S^* = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (K_{I(U)_i} - \overline{K_{I(U)}})^2}{n}}$.

Квантили распределения $d_{1-q/2}$ и $d_{q/2}$, получаем из таблицы Б.1 [110].

Критерий 2. Результаты измерений при $n = 24$ принадлежат нормальному распределению, если не более $m = 2$ разностей $\Delta K_{I(U)_i}$ превысили значение $Z_{P/2} \cdot S$, где S – среднее квадратичное отклонение, $Z_{P/2} = 2,17$ – верхний квантиль распределения нормированной функции Лапласа, определенный по таблицам Б.2 и Б.3 при числе измерений $n = 24$ [110].

7. Коэффициент Стьюдента $t = 2,069$ для заданной доверительной вероятности $P = 0,95$ при числе измерений $n = 24$ (таблица Д.1) [110].

8. Доверительный интервал (погрешность измерений) определен по формуле

$$\varepsilon = \frac{S}{\sqrt{n}} \cdot t. \quad (2.6)$$

Таблица 2.5 – Результаты измерений и статистической обработки

| Номер измерения, n | K_I / K_U | Погрешность измерения $\Delta K_{I_i} / \Delta K_{U_i}$ | Квадрат погрешности измерения $(\Delta K_{I_i})^2 / (\Delta K_{U_i})^2$ |
|----------------------|----------------------|--|--|
| | Энергомонитор -3.3Т1 | | |
| | 2 | 3 | 4 |
| 1 | 8,58 / 9,21 | 0,278 / 0,475 | 0,077 / 0,225 |
| 2 | 7,68 / 9,2 | 1,178 / 0,485 | 1,389 / 0,235 |
| 3 | 9,19 / 8,93 | -0,331 / 0,755 | 0,109 / 0,570 |
| 4 | 9,24 / 9,67 | -0,381 / 0,015 | 0,145 / 0,0002 |
| 5 | 9,14 / 11,07 | -0,281 / -1,385 | 0,079 / 1,918 |
| 6 | 9,09 / 9,38 | -0,231 / 0,305 | 0,053 / 0,093 |
| 7 | 9,15 / 11,1 | -0,291 / -1,415 | 0,084 / 2,002 |
| 8 | 7,6 / 8,42 | 1,258 / 1,265 | 1,584 / 1,600 |
| 9 | 7,57 / 10,54 | 1,288 / -0,855 | 1,660 / 0,731 |
| 10 | 9,74 / 10,26 | -0,881 / -0,575 | 0,776 / 0,330 |
| 11 | 9,39 / 9,58 | -0,531 / 0,105 | 0,282 / 0,011 |

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|-----------------------------------|-----------------|------------------|----------------|
| 12 | 7,48 / 8,23 | 1,378 / 1,455 | 1,900 / 2,117 |
| 13 | 9,4 / 9,01 | -0,541 / 0,675 | 0,292 / 0,455 |
| 14 | 10,26 / 9,66 | -1,401 / 0,025 | 1,963 / 0,0006 |
| 15 | 7,18 / 9,03 | 1,678 / 0,655 | 2,818 / 0,429 |
| 16 | 10,09 / 11,32 | -1,231 / -1,635 | 1,515 / 2,673 |
| 17 | 7,02 / 8,65 | 1,838 / 1,035 | 3,381 / 1,071 |
| 18 | 9,97 / 9,61 | -1,111 / 0,075 | 1,234 / 0,006 |
| 19 | 9,89 / 10,18 | -1,031 / -0,495 | 1,063 / 0,245 |
| 20 | 6,97 / 10,7 | 1,888 / -1,015 | 3,567 / 1,030 |
| 21 | 10,45 / 8,93 | -1,591 / 0,755 | 2,532 / 0,570 |
| 22 | 10,32 / 8,78 | -1,461 / 0,905 | 2,135 / 0,819 |
| 23 | 6,79 / 9,98 | 2,068 / -0,295 | 4,279 / 0,087 |
| 24 | 10,42 / 11 | -1,561 / -1,315 | 2,437 / 1,729 |
| $\Sigma K_I / \Sigma K_U$ | 212,61 / 232,44 | 25,718 / 17,97 | 0,077 / 18,950 |
| $\overline{K_I} / \overline{K_U}$ | 8,859 / 9,685 | – | – |

Основные результаты вычислений погрешностей с доверительной вероятностью $P = 0,95$ в соответствии с вышепредставленным алгоритмом приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Результаты вычислений погрешностей

| Параметр | K_I | K_U |
|-------------------|-------------------|-------------------|
| | $\Xi-3.3T1$ | $\Xi-3.3T1$ |
| S | 1,240 | 0,908 |
| S^* | 1,214 | 0,889 |
| $d_{1-q/2}$ | 0,704 | |
| \tilde{d} | 0,883 | 0,843 |
| $d_{q/2}$ | 0,890 | |
| $Z_{P/2} \cdot S$ | 2,691 | 1,9697 |
| ε | 0,524 | 0,383 |
| $K_{I(U)}$ | $8,859 \pm 0,524$ | $9,685 \pm 0,383$ |

Как следует из результатов вычислений и оценки первого и второго критериев (таблица 2.6) погрешности результатов измерений K_I и K_U распределены по нормальному закону. Согласно ГОСТ Р 8.736–2011 [110], окончательный результат измерений для скиповой ПУ с учетом доверительной вероятности $P = 0,95$ представляется в виде:

$$K_I = 8,86 \pm 0,524 \% ; K_U = 9,69 \pm 0,383 \% .$$

Поскольку остальные параметры режимов работы и показателей ЭМС высоковольтной системы электроснабжения ПУ проведены в аналогичных условиях, то данные результаты распространяются на все результаты экспериментальных исследований.

Экспериментальные исследования подтвердили наличие ВГ токов и напряжений в высоковольтной системе электроснабжения скиповой и клетевой ПУ Яковлевского рудника. Также можно отметить, что значения 37-й гармонической составляющей напряжения свидетельствует о наличии в сети резонансных явлений. Так как в циклах работы ПУ около 50 % времени циклов составляют динамические процессы, то показатели ЭМС изменяются в соответствии с изменениями скоростей движения и токов якорей подъемных двигателей.

2.2. Имитационное моделирование высоковольтной рудничной системы электроснабжения подъемных установок

Экспериментальные исследования в высоковольтной системе электроснабжения ПУ производились в режиме реального времени, что позволяет оценить значения параметров режимов и показателей ЭМС при нагрузках в данный момент времени, но не дают возможности их оценки при изменении схемы электроснабжения, параметров электроустановок или режимов. С целью анализа показателей режимов и ЭМС и выявления дополнительных факторов, влияющих на электромагнитную обстановку при изменении режимов работы ПУ, выполнено имитационное моделирование высоковольтной системы электроснабжения.

Имитационное моделирование проведено в программном комплексе Matlab с пакетом расширений Simulink и библиотекой SimPowerSystems [111, 112]. Имитационные модели отдельных элементов сети включены в той же последовательности, что и в реальной схеме электроснабжения (см. рисунок 1.1). На рисунке 2.4 представлена имитационная модель высоковольтной системы электроснабжения скиповой ПУ Яковлевского рудника. Параметры отдельных элементов модели определены в соответствии с техническими характеристиками систем электроснабжения скиповой и клетевой ПУ.

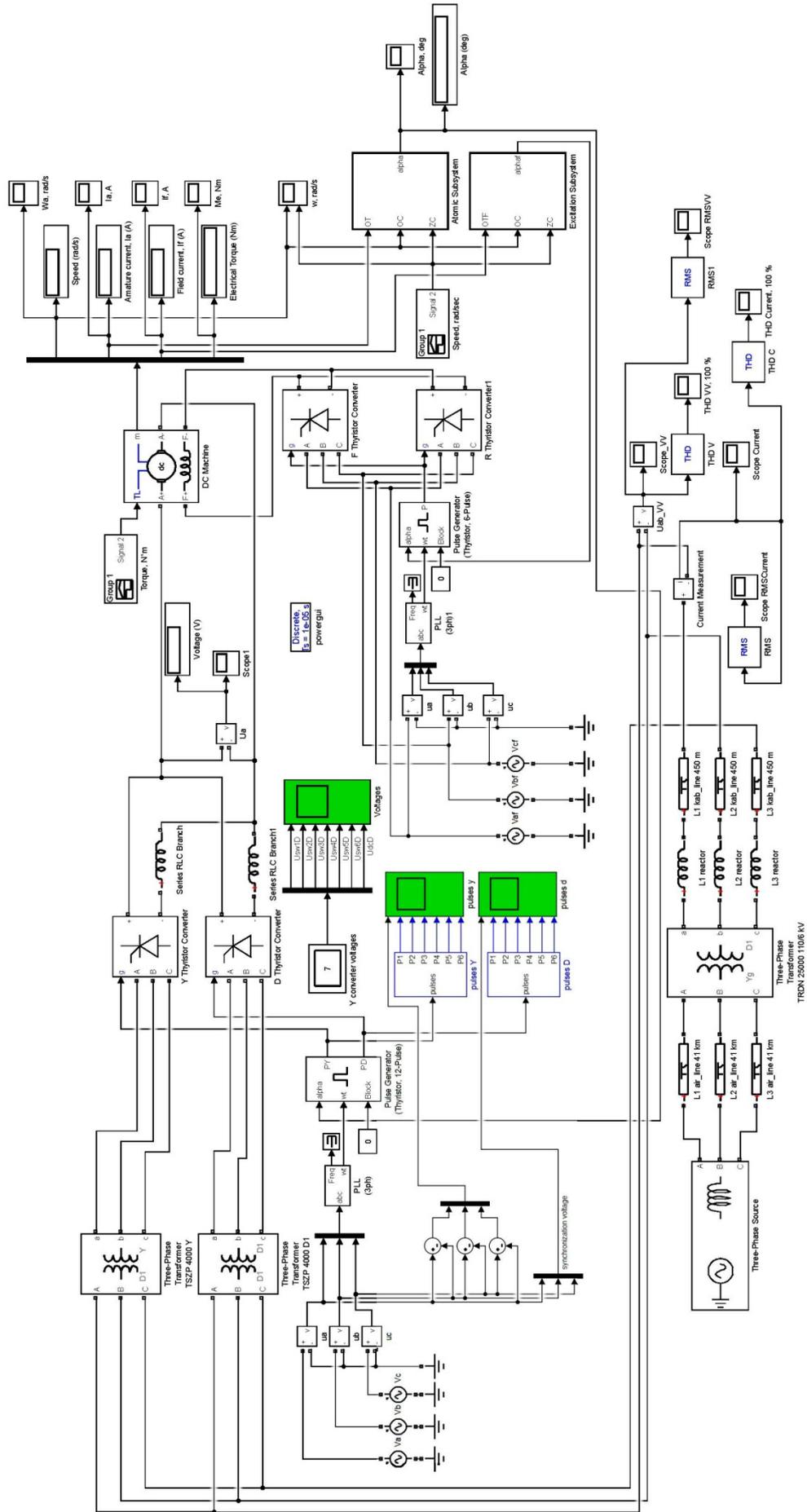


Рисунок 2.4. Имитационная модель высоковольтной системы электроснабжения скиповой ПУ

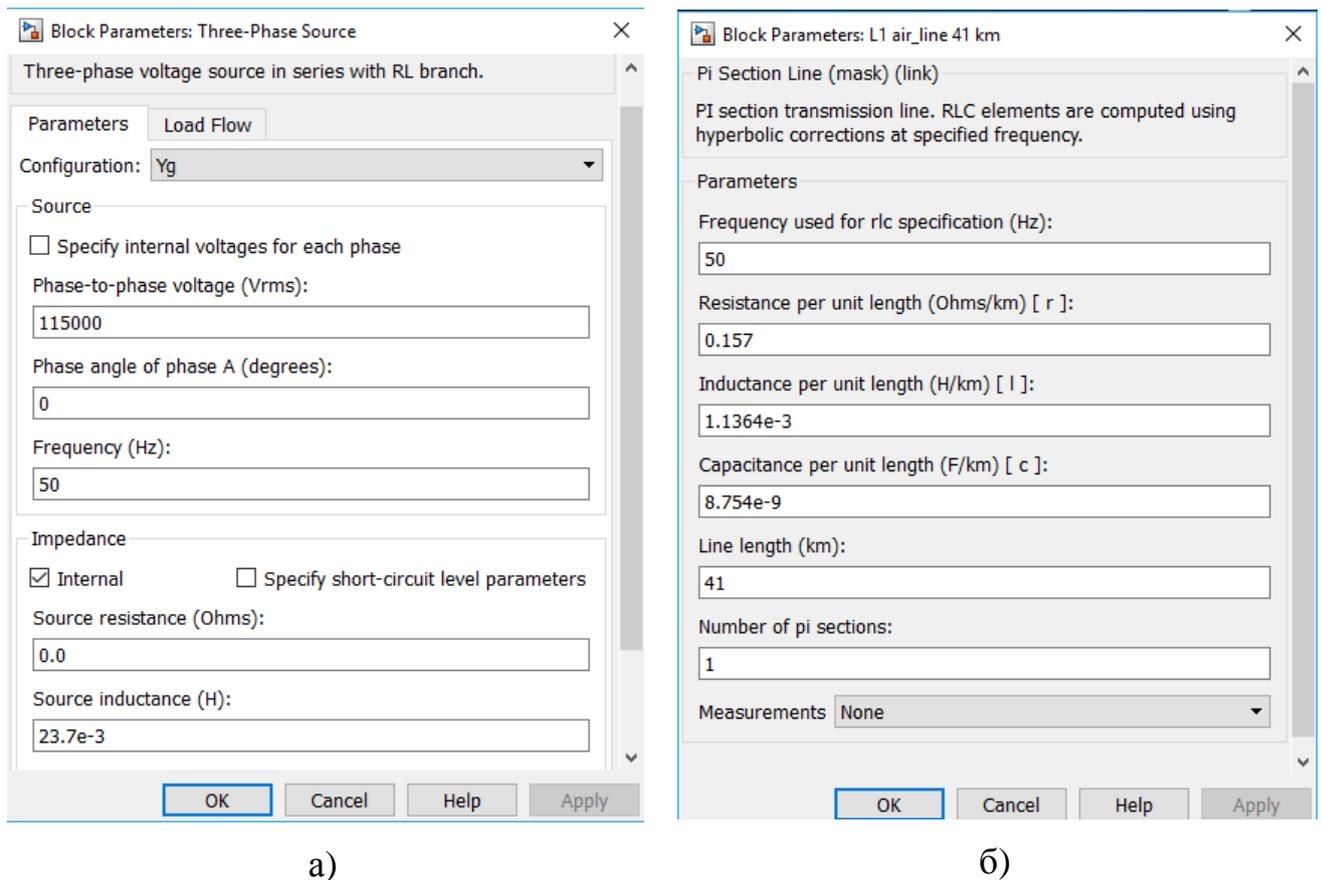
Имитационная модель высоковольтной системы электроснабжения клетевой ПУ имеет аналогичную структуру, отличается лишь параметрами используемого оборудования и согласующими трансформаторами (приложение Б).

Результаты расчета параметров отдельных элементов моделей представлены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Расчетные параметры отдельных элементов моделей

| Элемент системы электроснабжения | Расчетные формулы | Значения параметров схем замещения |
|--|---|---|
| Система | $X_C = \frac{E_C^2}{S_{КЗ}}$ | $X_{C,max} = 19,85 \text{ Ом};$ $X_{C,min} = 15,49 \text{ Ом}$ |
| Высоковольтная линия 110 кВ, провод АС-185 | $R = R_0 \cdot L;$ $X = X_0 \cdot L;$ $B_C = B_{C0} \cdot L$ | $R_1 = 6,46 \text{ Ом};$ $X_1 = 16,77 \text{ Ом};$ $B_{C1} = 111,53 \text{ мкСм}$ |
| Трансформатор ТРДН-25000/110 | $R_T = \frac{\Delta P_K \cdot U_{BH}^2}{n \cdot S_H^2}; X_T = \frac{U_K \cdot U_{BH}^2}{100 \cdot n \cdot S_H};$ $G_{XX} = \frac{n \cdot \Delta P_{XX}}{U_{НОМ}^2}; B_{XX} = \frac{n \cdot I_{XX} \cdot S_{НОМ}}{100 \cdot U_{НОМ}^2}$ | $R_2 = 2,54 \text{ Ом};$ $X_2 = 55,55 \text{ Ом};$ $G_{t1} = 2,04 \text{ мкСм};$ $B_{t1} = 13,23 \text{ мкСм}$ |
| Реактор РБСГ 10-2-1600-0,25 | - | $X_3 = 0,25 \text{ Ом}$ |
| Кабельная линия 6 кВ, кабель ААБЛГ-6,3×150 | $R = R_0 \cdot L;$ $X = X_0 \cdot L;$ $B_C = B_{C0} \cdot L$ | $R_3 = 0,09 \text{ Ом};$ $X_3 = 0,03 \text{ Ом};$ $B_{C2} = 260,00 \text{ мкСм}$ |
| Трансформатор ТДТП-8000/10 У2 | $R_T = \frac{\Delta P_K \cdot U_{BH}^2}{n \cdot S_H^2}; X_T = \frac{U_K \cdot U_{BH}^2}{100 \cdot n \cdot S_H};$ $G_{XX} = \frac{n \cdot \Delta P_{XX}}{U_{НОМ}^2}; B_{XX} = \frac{n \cdot I_{XX} \cdot S_{НОМ}}{100 \cdot U_{НОМ}^2}$ | $R_4 = 0,05 \text{ Ом};$ $X_4 = 0,35 \text{ Ом};$ $G_{t2} = 0,18 \text{ мСм};$ $B_{t2} = 0,25 \text{ мСм}$ |
| Трансформатор ТСЗП-4000/10 У3 | $R_T = \frac{\Delta P_K \cdot U_{BH}^2}{n \cdot S_H^2}; X_T = \frac{U_K \cdot U_{BH}^2}{100 \cdot n \cdot S_H};$ $G_{XX} = \frac{n \cdot \Delta P_{XX}}{U_{НОМ}^2}; B_{XX} = \frac{n \cdot I_{XX} \cdot S_{НОМ}}{100 \cdot U_{НОМ}^2}$ | $R_4 = 0,06 \text{ Ом};$ $X_4 = 0,67 \text{ Ом};$ $G_{t2} = 0,36 \text{ мСм};$ $B_{t2} = 2,22 \text{ мСм}$ |

Трехфазный источник электрической энергии 110 кВ имитационных моделей представлен блоком Three-Phase Source библиотеки SimPowerSystem из раздела Electrical Sources.



а)

б)

Рисунок 2.5. Окно параметров блока Three-Phase Source (а) и PI Section (б)

Высоковольтные линии электропередачи 110 кВ в имитационной модели представлены блоком PI Section Line из раздела Elements. Изображение окон ввода параметров источника электрической энергии 110 кВ и линии электропередач представлены на рисунке 2.5.

Силовой трансформатор типа ТРДН-25000/110, установленный на ГПП рудника, представлен в модели блоком Three-Phase Transformer (Two Windings) из категории Elements, параметры которого представлены окном параметров на рисунке 2.6.

Модель согласующего реактора, установленного на ГПП, представлена с помощью блока Series RLC Branch из группы Elements в виде номинальной индуктивности.

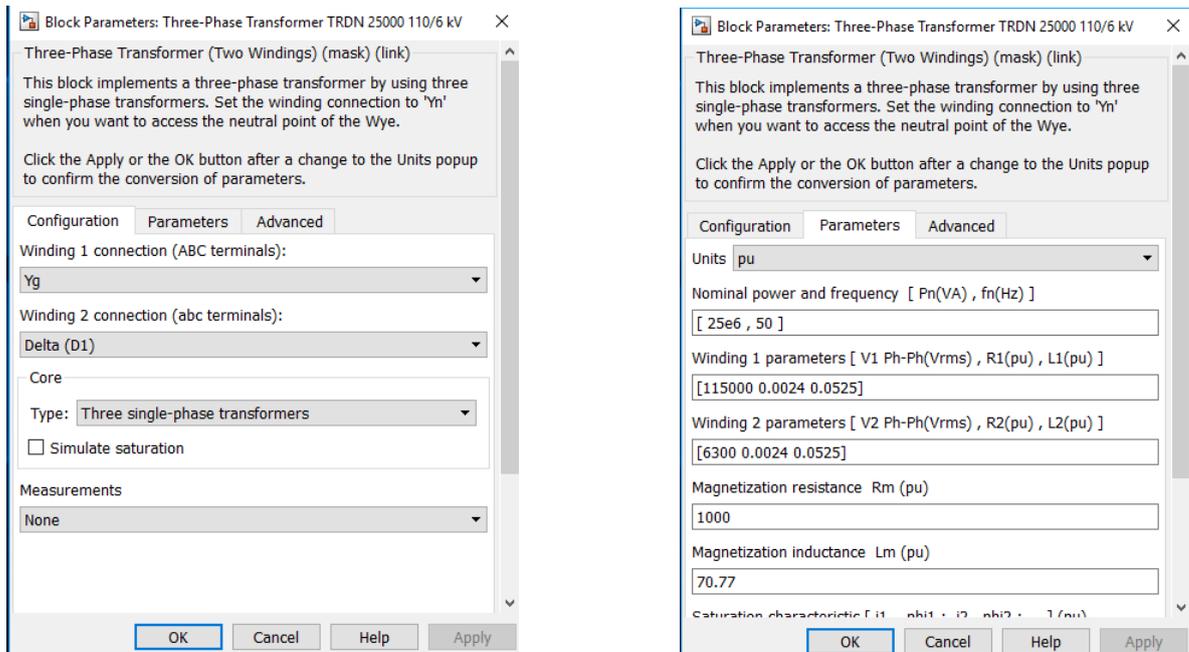


Рисунок 2.6. Окно параметров Three-Phase Transformer (Two Windings) трансформатора типа ТРДН-25000/110

Согласующие двухобмоточные трансформаторы соответственно с одной активной частью ТСЗП 4000/10 и двумя активными частями ТДТП-8000/10 представлены в модели боками Three-Phase Transformer (Two Windings, Three Windings). Окна ввода параметров трансформаторов представлены на примере трансформатора ТСЗП 4000/10 на рисунке 2.7.

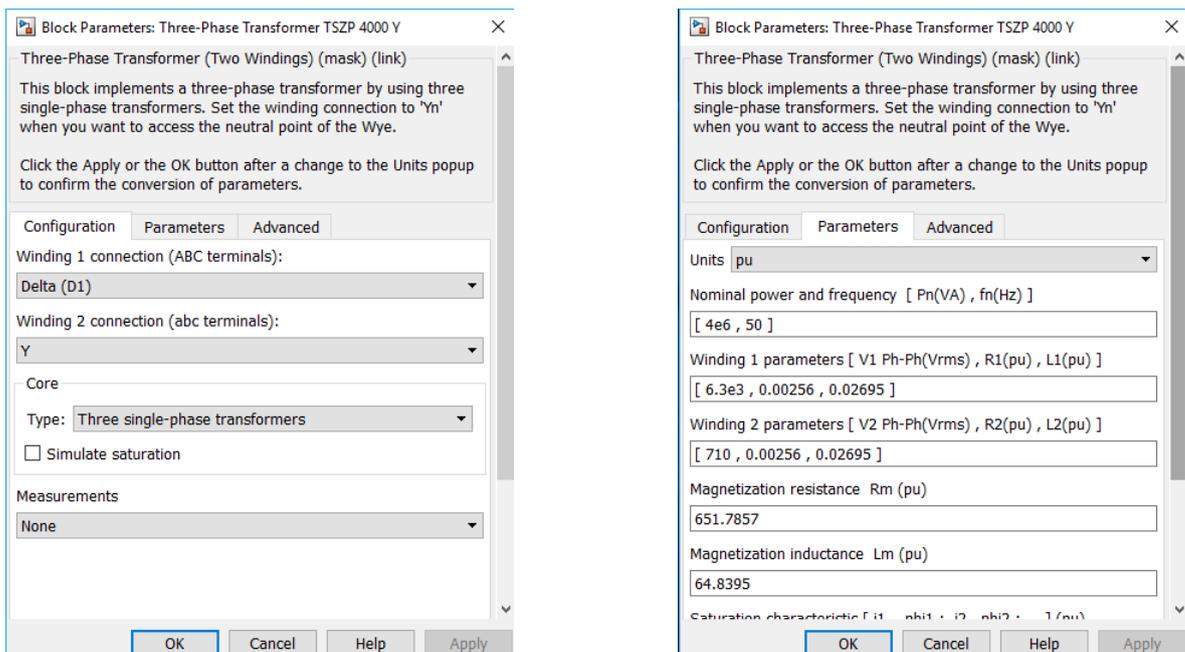


Рисунок 2.7. Окно параметров Three-Phase Transformer (Two Windings) трансформатора с одной активной частью типа ТСЗП 4000/10

Активные сопротивления и индуктивности обмоток трансформаторов заданы в относительных единицах, значения которых определены по выражениям, представленным в таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Активные сопротивления и индуктивности обмоток трансформаторов в относительных единицах

| Тип трансформатора | Параметр трансформатора | Расчетная формула | Результаты расчета |
|--------------------|---|--|---|
| ТРДН-25000/110 | Активное сопротивление и индуктивность первичной и вторичной обмоток | $R_{o.e.1} = R_{o.e.2} = \frac{R}{2 \cdot Z_B};$ $L_{o.e.1} = L_{o.e.2} = \frac{X}{2 \cdot Z_B}$ | $R_1 = 0,0024 \text{ о.е.};$ $L_1 = 0,0525 \text{ о.е.};$ $R_2 = 0,0024 \text{ о.е.};$ $L_2 = 0,0525 \text{ о.е.}$ |
| | Относительное активное сопротивление и индуктивность ветви намагничивания | $R_{m.o.e.} = \frac{1}{Z_B \cdot G};$ $L_{m.o.e.} = \frac{1}{Z_B \cdot B}$ | $R_m = 1000 \text{ о.е.};$ $L_m = 70,77 \text{ о.е.}$ |
| ТДТП-8000/10 | Активное сопротивление и индуктивность первичной и вторичной обмоток | $R_{o.e.1} = \frac{R}{2 \cdot Z_B};$ $L_{o.e.1} = \frac{X}{2 \cdot Z_B};$ $R_{o.e.2} = \frac{R}{Z_B};$ $L_{o.e.2} = \frac{X}{Z_B}$ | $R_1 = 0,00433 \text{ о.е.};$ $L_1 = 0,030 \text{ о.е.};$ $R_2 = 0,00867 \text{ о.е.};$ $L_2 = 0,060 \text{ о.е.}$ |
| | Относительное активное сопротивление и индуктивность ветви намагничивания | $R_{m.o.e.} = \frac{1}{Z_B \cdot G};$ $L_{m.o.e.} = \frac{1}{Z_B \cdot B}$ | $R_m = 976,19 \text{ о.е.};$ $L_m = 70,65 \text{ о.е.}$ |
| ТСЗП-4000/10 | Активное сопротивление и индуктивность первичной и вторичной обмоток | $R_{o.e.1} = R_{o.e.2} = \frac{R}{2 \cdot Z_B};$ $L_{o.e.1} = L_{o.e.2} = \frac{X}{2 \cdot Z_B}$ | $R_1 = 0,00256 \text{ о.е.};$ $L_1 = 0,02695 \text{ о.е.};$ $R_2 = 0,00256 \text{ о.е.};$ $L_2 = 0,02695 \text{ о.е.}$ |
| | Относительное активное сопротивление и индуктивность ветви намагничивания | $R_{m.o.e.} = \frac{1}{Z_B \cdot G};$ $L_{m.o.e.} = \frac{1}{Z_B \cdot B}$ | $R_m = 651,79 \text{ о.е.};$ $L_m = 64,84 \text{ о.е.}$ |

Примечание: где Z_B – базовое сопротивление, Ом, $Z_B = U_{1H}^2 / S_H$; U_{1H} – напряжение первичной обмотки трансформатора, кВ; S_H – полная мощность трансформатора, МВА.

Блок Universal Bridge из раздела Power Electronics использовался для моделирования управляемых 12-пульсных тиристорных преобразователей. Параметры тиристорных преобразователей заданы рекомендуемыми значениями [111, 112].

Электропривод подъёмных установок, выполненный по системе ТП-Д, построен по принципу подчиненного регулирования. Так как диаграмма изменения скорости движения подъёмных сосудов выполняется за счет электропривода, то в модели электропривод представлен полным аналогом реальной системы. Система управления электроприводом для каждой модели представлена блоками Atomic Subsystem.

Реальные системы управления электроприводами ПУ выполняются как замкнутые системы, построенные по принципу согласованного управления по току якоря и току возбуждения. Структурная модель системы управления электроприводом на примере скиповой ПУ представлена на рисунке 2.8.

В системе управления приняты пропорционально интегральные регуляторы (ПИ-Р). Контур токов якоря и токов возбуждения подчинены контуру скорости. При этом все регуляторы за исключением регулятора скорости настроены на модульный оптимум. Регулятор скорости – на симметричный оптимум. Реверсирование момента осуществляется с помощью тиристорного преобразователя системы возбуждения. Параметры регуляторов системы управления приняты в соответствии с техническими отчетами по результатам годовой ревизии, наладки и испытания шахтных подъёмных машин [113, 114].

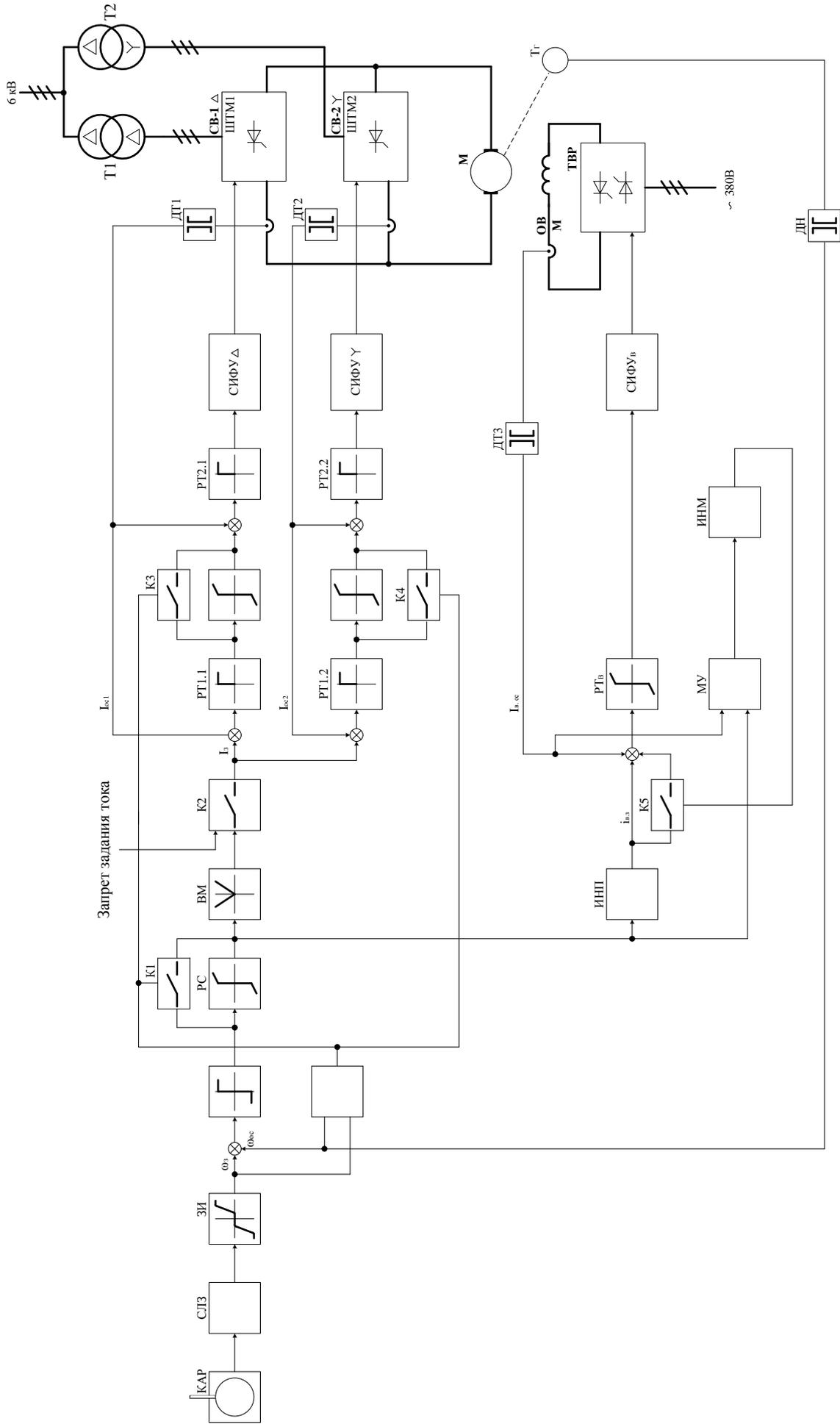


Рисунок 2.8. Структурная модель системы управления электроприводом скиповой ПУ

Двигатели постоянного тока с независимым возбуждением представлены блоками DC Machine. Для представления параметров в окне блока DC Machine произведены расчеты основных параметров двигателей, сопротивления обмоток якорей и возбуждения (таблица 2.9).

На рисунке 2.9 представлено окно параметров блока модели DC Machine на примере скиповой ПУ.

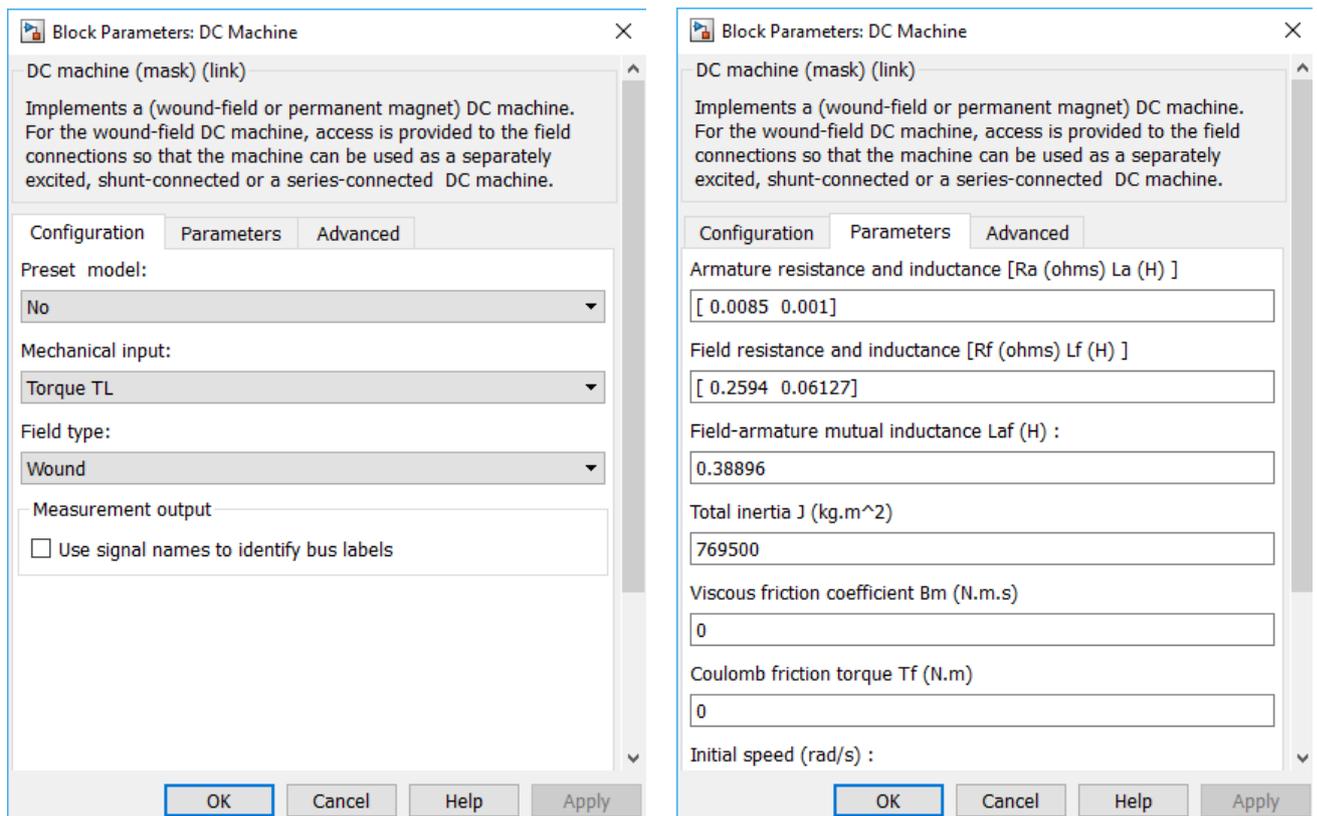


Рисунок 2.9. Окно параметров блока DC Machine

Модель двигателя разделена на электрическую и механическую части. Электрическая цепь состоит из якорной цепи двигателя с выводами A+ и A– и цепи обмотки возбуждения (F+; F–) [111]. Питание цепи возбуждения осуществляется с помощью источника постоянного напряжения 110 В (блок DC Voltage Source), якорная цепь запитана непосредственно от 12-пульсного тиристорного преобразователя. Механическая часть представлена входом TL, на который подается момент (скорость) внешней нагрузки. На выходном порту m формируется векторный сигнал, состоящий из четырех элементов: скорости, тока якоря, тока возбуждения и электромагнитного момента машины. Значения моментов инерции каждого двигателя определены на основании технических отчетов подъемных

установок. Результаты расчета параметров моделей двигателей постоянного тока представлены в таблице 2.9.

Таблица 2.9 – Расчетные и конструктивные параметры моделей ДПТ

| Расчетный параметр двигателя | Расчетная формула | Результаты расчета П2Ш-800-256-7К (скиповая ПУ) | Результаты расчета П2-25/105-3,55 (клетевая ПУ) |
|---|---|---|---|
| Сопrotивление обмотки якоря $R_{я}$, Ом | – | 0,0085 | 0,0093 |
| Сопrotивление обмотки возбуждения $R_{в}$, Ом | – | 0,25 | 0,558 |
| Номинальный момент ДПТ M_H , кН·м | $M_H = \frac{30 \cdot P_H}{\pi \cdot n}$ | 954,93 | 847,50 |
| Конструктивный коэффициент $C_{M \cdot \Phi}$ | – | 164,93 | 206,71 |
| Индуктивность обмотки якоря $L_{я}$, мГн | $L_{я} = C \cdot \frac{U_{я.H}}{I_{я.H} \cdot n_H \cdot p}$ | 1,00 | 1,58 |
| Индуктивность обмотки возбуждения L_f , мГн | $L_f = (2 - 5) \cdot \frac{L_{я} \cdot R_f}{R_{я}}$ | 59,05 | 189,02 |
| Взаимная индуктивность $L_{я.f}$, Гн | $L_{я.f} = \frac{M_H}{I_{я.H} \cdot I_f}$ | 0,37 | 1,05 |
| Момент инерции J , кг·м ² | – | 644500 | 664355 |
| Момент сухого трения T_f , Н·м | $T_f = \frac{P_{MEX}}{2 \cdot \omega_H}$ | 4774,65 | 4237,50 |
| Коэффициент вязкого трения B_M , Н·м·с | $B_M = \frac{P_{MEX}}{2 \cdot \omega_H^2}$ | 911,89 | 1011,63 |

Примечание: где C – коэффициент для машин с компенсационной обмоткой, $C = 1 \div 2,5$; P_{MEX} – общие механические потери машины, $P_{MEX} = (0,005 \div 0,02) \cdot P_H$.

Для измерения токов якоря и обмотки возбуждения, электрического момента и скорости двигателя использовались блоки Scope, Display и Demux. Блок Scope позволяет снять осциллограмму входной величины за время моделирования. Результат представляется в виде графика. Блок Display регистрирует мгновенные значения величин во время моделирования, отображая их на пиктограмме. Блок Demux используется для передачи информации от двигателя к блокам Scope и Display. Напряжение якорной обмотки также регистрируется устройством Scope через блок Voltage Measurement. Для определения значений коэффициентов гармонических составляющих тока и напряжения в сети 6 кВ использовались блоки THD. Для отображения импульсов, поступающих на управляющие электроды тиристоров, использовался блок pulses Y(D). Отображение значений напряжений на вентилях тиристорного преобразователя осуществлялось блоком Multimeter. Необходимым при моделировании электрических систем и цепей является блок Powergui. Он используется для хранения эквивалентной Simulink-модели и обеспечивает решение следующих задач: расчет схемы комплексным методом; расчет установившегося режима; дискретизация модели; задание начальных условий; выполнение гармонического анализа и т.д. Блок также использовался для разложения кривых тока и напряжения на гармонические составляющие.

Полученные имитационные модели с системами управления электроприводами позволили достаточно точно повторить диаграммы изменения скоростей и якорных токов подъемных двигателей.

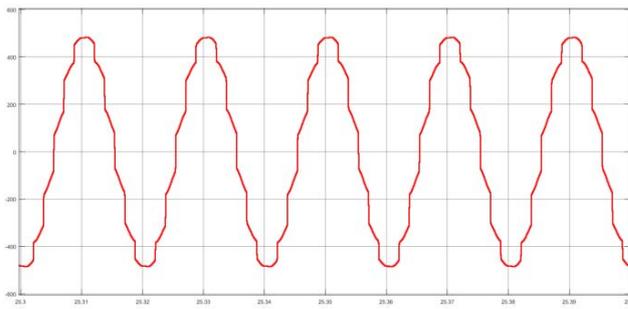
Результаты моделирования представлены в виде таблиц (таблицы 2.10, 2.11), а также в виде осциллограмм токов и напряжений и спектров ВГ токов и напряжений в высоковольтной системе электроснабжения скиповой и клетевой ПУ (рисунки 2.10, 2.11).

Таблица 2.10 – Результаты моделирования режимов и показателей ЭМС
по напряжению

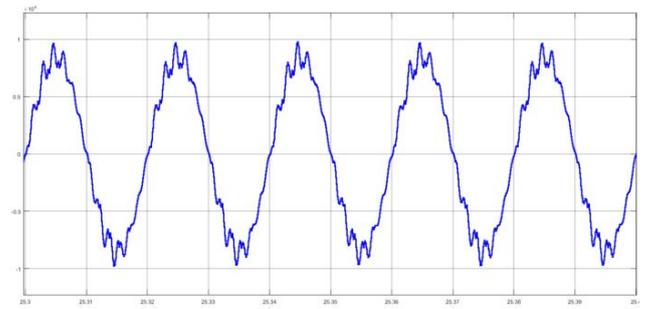
| Время | U, В | I, А | K _U , % | K _{U(11)} , % | K _{U(13)} , % | K _{U(23)} , % | K _{U(25)} , % | K _{U(35)} , % | K _{U(37)} , % | α, град. |
|-------------|------|-------|--------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|----------|
| Скиповая ПУ | | | | | | | | | | |
| 00:19 | 6098 | 243 | 4,06 | 2,34 | 2,97 | 1,04 | 0,64 | 0,40 | 0,32 | 84,8 |
| 00:20 | 6022 | 328,6 | 8,29 | 4,55 | 6,26 | 2,06 | 1,32 | 0,80 | 0,64 | 82,3 |
| 00:21 | 6018 | 332,2 | 8,48 | 4,66 | 6,40 | 2,11 | 1,35 | 0,82 | 0,66 | 79,6 |
| 00:22 | 6007 | 343,7 | 9,15 | 5,01 | 6,91 | 2,27 | 1,46 | 0,88 | 0,71 | 76,45 |
| 00:23 | 6005 | 346,4 | 9,39 | 5,13 | 7,08 | 2,33 | 1,49 | 0,90 | 0,73 | 73,3 |
| 00:24 | 6005 | 347,3 | 9,55 | 5,23 | 7,24 | 2,37 | 1,52 | 0,91 | 0,75 | 70,2 |
| 00:25 | 6006 | 348 | 9,75 | 5,32 | 7,38 | 2,42 | 1,55 | 0,94 | 0,75 | 67 |
| 00:26 | 6008 | 348,1 | 9,94 | 5,41 | 7,53 | 2,47 | 1,58 | 0,95 | 0,77 | 63,85 |
| 00:27 | 6072 | 281,6 | 6,49 | 3,62 | 4,89 | 1,64 | 1,03 | 0,64 | 0,51 | 62,25 |
| 00:28 | 6097 | 252,7 | 5,18 | 2,92 | 3,86 | 1,32 | 0,82 | 0,51 | 0,4 | 61,3 |
| Клетевая ПУ | | | | | | | | | | |
| 00:15 | 6037 | 318,5 | 1,82 | 0,91 | 1,41 | 0,46 | 0,31 | 0,18 | 0,15 | 87,06 |
| 00:18 | 6045 | 309 | 1,40 | 0,66 | 1,05 | 0,33 | 0,23 | 0,13 | 0,11 | 87,05 |
| 00:21 | 5950 | 406 | 6,55 | 3,35 | 5,01 | 1,65 | 1,10 | 0,64 | 0,53 | 79,6 |
| 00:24 | 5895 | 465 | 10,20 | 5,29 | 7,83 | 2,59 | 1,71 | 1,00 | 0,83 | 70,15 |
| 00:25 | 5796 | 576 | 16,22 | 8,52 | 12,54 | 4,15 | 2,71 | 1,59 | 1,30 | 67,0 |
| 00:26 | 5794 | 585 | 17,07 | 8,90 | 13,08 | 4,33 | 2,83 | 1,65 | 1,35 | 63,86 |
| 00:27 | 5868 | 506,5 | 12,94 | 6,79 | 10,01 | 3,32 | 2,17 | 1,28 | 10,5 | 62,24 |
| 00:30 | 5925 | 448 | 10,24 | 5,35 | 7,93 | 2,61 | 1,73 | 1,01 | 0,84 | 59,53 |
| 00:33 | 6047 | 315 | 3,84 | 1,98 | 2,96 | 0,97 | 0,64 | 0,38 | 0,31 | 56,81 |
| 00:35 | 6076 | 285 | 2,54 | 1,31 | 1,96 | 0,64 | 0,42 | 0,25 | 0,20 | 55,22 |

Таблица 2.11 – Результаты моделирования режимов и показателей ЭМС по току

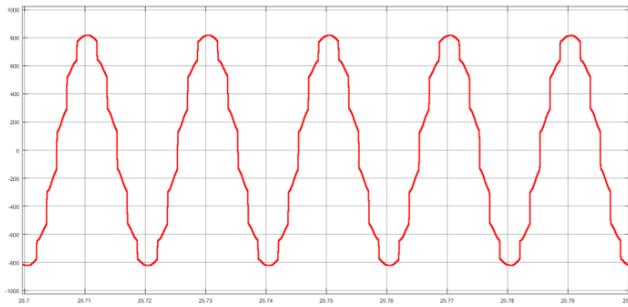
| Время | I _d , А | K _I , % | I ₍₁₎ , А | K _{I(11)} , % | K _{I(13)} , % | K _{I(23)} , % | K _{I(25)} , % | K _{I(35)} , % | K _{I(37)} , % |
|-------------|--------------------|--------------------|----------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Скиповая ПУ | | | | | | | | | |
| 00:19 | 2600 | 5,06 | 248,1 | 3,17 | 2,27 | 1,54 | 1,33 | 0,99 | 0,89 |
| 00:20 | 3550 | 7,36 | 329,3 | 4,61 | 3,52 | 2,27 | 2,01 | 1,46 | 1,35 |
| 00:21 | 3600 | 7,45 | 332,2 | 4,67 | 3,58 | 2,30 | 2,04 | 1,47 | 1,37 |
| 00:22 | 3720 | 7,73 | 343,0 | 4,85 | 3,74 | 2,39 | 2,13 | 1,53 | 1,43 |
| 00:23 | 3750 | 7,86 | 345,2 | 4,93 | 3,80 | 2,43 | 2,16 | 1,56 | 1,45 |
| 00:24 | 3770 | 7,98 | 346,4 | 5,01 | 3,88 | 2,47 | 2,21 | 1,58 | 1,47 |
| 00:25 | 3780 | 8,11 | 346,8 | 5,09 | 3,94 | 2,51 | 2,24 | 1,61 | 1,49 |
| 00:26 | 3790 | 8,28 | 347,0 | 5,20 | 4,04 | 2,57 | 2,29 | 1,64 | 1,52 |
| 00:27 | 3030 | 6,92 | 279,1 | 4,35 | 3,29 | 2,14 | 1,88 | 1,37 | 1,26 |
| 00:28 | 2710 | 6,18 | 251,9 | 3,90 | 2,88 | 1,91 | 1,66 | 1,22 | 1,12 |
| Клетевая ПУ | | | | | | | | | |
| 00:15 | 2630 | 1,69 | 318,2 | 0,96 | 0,83 | 0,52 | 0,49 | 0,34 | 0,32 |
| 00:18 | 2530 | 1,36 | 308,7 | 0,71 | 0,64 | 0,39 | 0,38 | 0,25 | 0,25 |
| 00:21 | 3380 | 4,66 | 405,5 | 2,72 | 2,27 | 1,46 | 1,34 | 0,93 | 0,89 |
| 00:24 | 3890 | 6,26 | 464,7 | 3,72 | 3,06 | 1,97 | 1,82 | 1,26 | 1,20 |
| 00:25 | 4875 | 7,82 | 574,8 | 4,75 | 3,90 | 2,51 | 2,29 | 1,59 | 1,50 |
| 00:26 | 4950 | 8,94 | 582,5 | 5,65 | 4,43 | 2,8 | 2,49 | 1,78 | 1,64 |
| 00:27 | 4275 | 7,26 | 504,4 | 4,37 | 3,59 | 2,32 | 2,11 | 1,47 | 1,39 |
| 00:30 | 3770 | 6,59 | 446,8 | 3,93 | 3,24 | 2,09 | 1,91 | 1,33 | 1,27 |
| 00:33 | 2620 | 3,62 | 313,8 | 2,12 | 1,76 | 1,12 | 1,03 | 0,72 | 0,69 |
| 00:35 | 2350 | 2,67 | 283,2 | 1,56 | 1,29 | 0,82 | 0,75 | 0,53 | 0,50 |



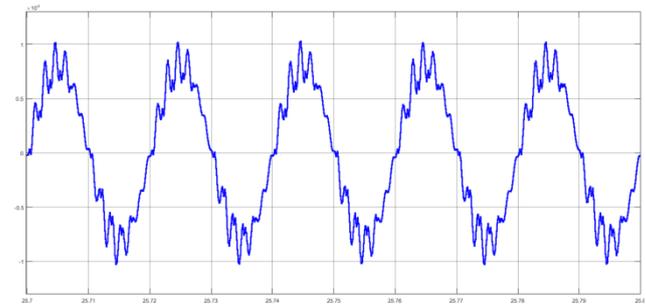
а)



б)

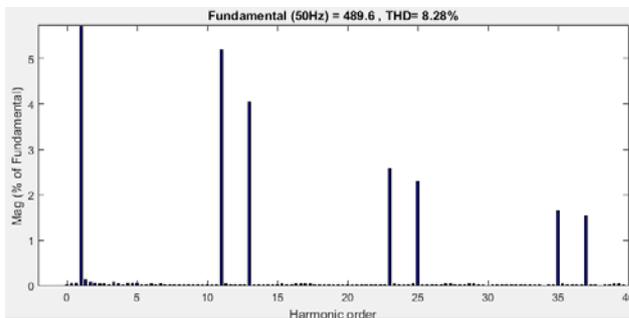


в)

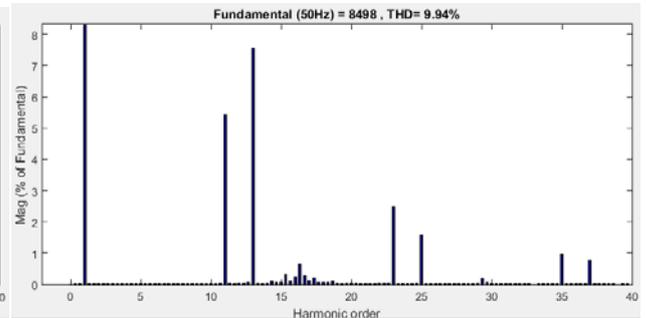


г)

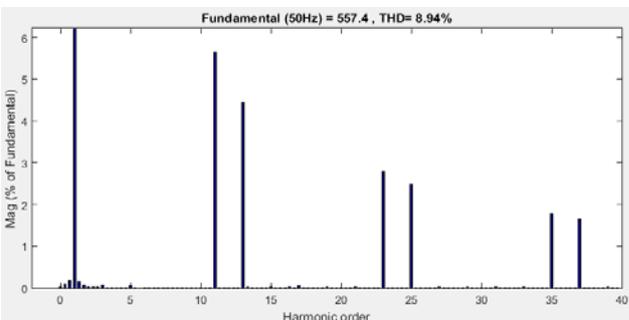
Рисунок 2.10. Осциллограммы тока (а, в) и напряжения (б, г) при моделировании в питающей сети скиповой ПУ (а, б) и клетевой ПУ (в, г)



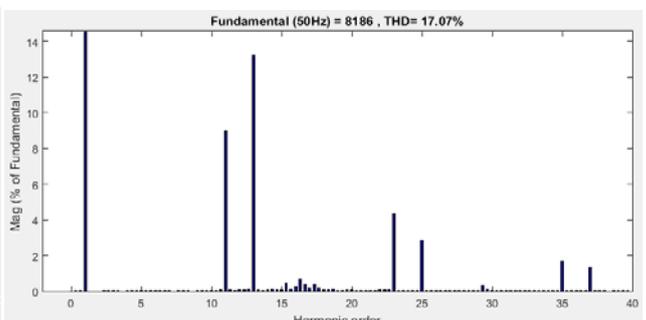
а)



б)

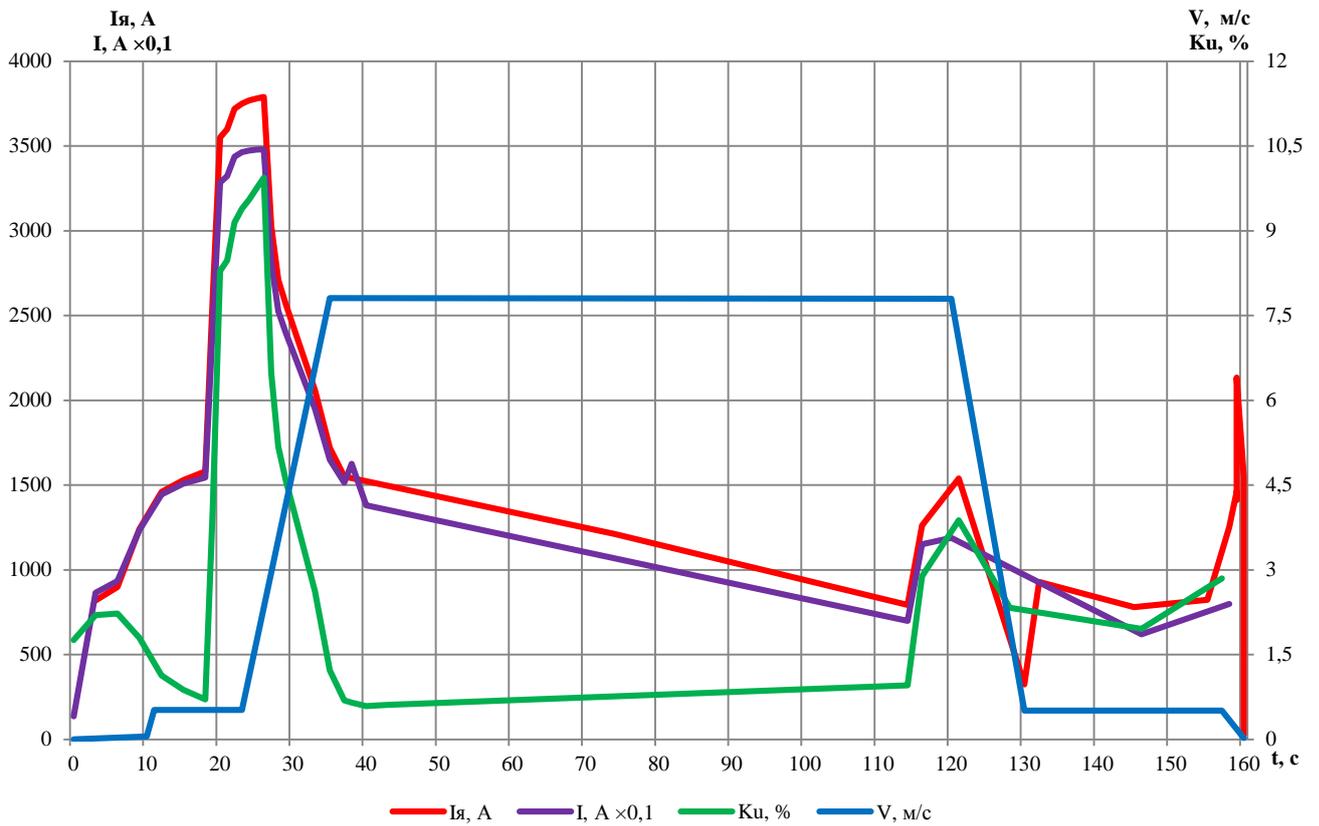


в)

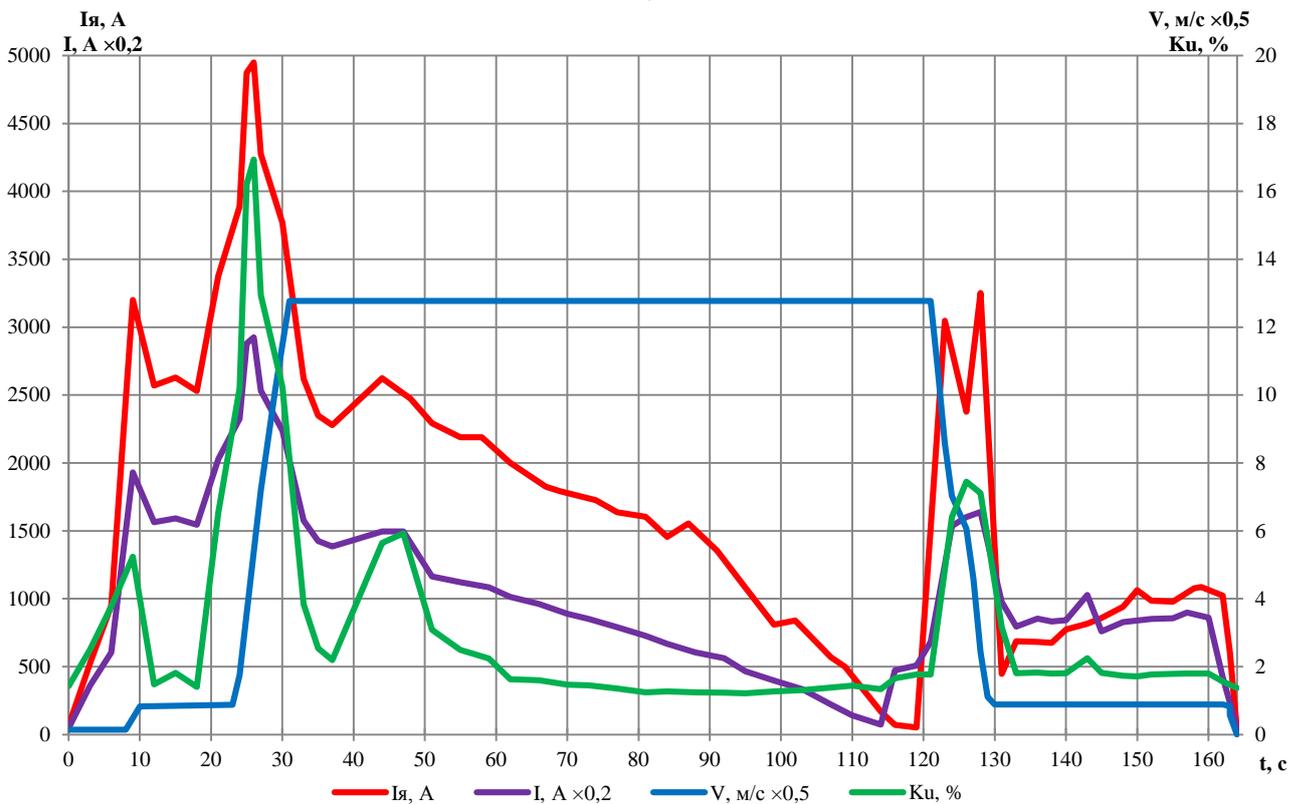


г)

Рисунок 2.11. Спектры гармоник тока (а, в) и напряжения (б, г) при моделировании в питающей сети скиповой ПУ (а, б) и клетевой ПУ (в, г)



а)



б)

Рисунок 2.12. Графики изменения вводного и якорного токов, скорости с наложением суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения за цикл при моделировании:

а – для скиповой ПУ; б – для клетевой ПУ

Как следует из представленных результатов имитационного моделирования нелинейность токов и напряжений за счет генерирования ВГ значительная. Для скиповой и клетевой подъемных установок значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения соответственно составили $K_U = 9,94 \%$ и $K_U = 17,07 \%$.

Результаты имитационного моделирования также подтвердили наличие гармоник 11, 13, 23, 25, 35 и 37-го порядка в высоковольтных системах электрообеспечения скиповой и клетевой подъемных установок.

2.3. Аналитическая оценка показателей электромагнитной совместимости в высоковольтной рудничной сети

Дополнительно к измерениям и имитационному моделированию была проведена оценка гармоник тока и коэффициентов гармонических составляющих тока, а также суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения в высоковольтных системах электрообеспечения ПУ аналитическим способом. Расчет выполнялся для оценки и сравнения результатов экспериментальных исследований, имитационного моделирования и аналитического расчета, а также для анализа достоверности полученных результатов.

Аналитические расчеты производились на основании схем замещения систем электрообеспечения скиповой и клетевой ПУ, представленных на рисунке 2.13. Значения параметров схем замещения приведены к напряжению питающей сети или к мощности тиристорных преобразователей.

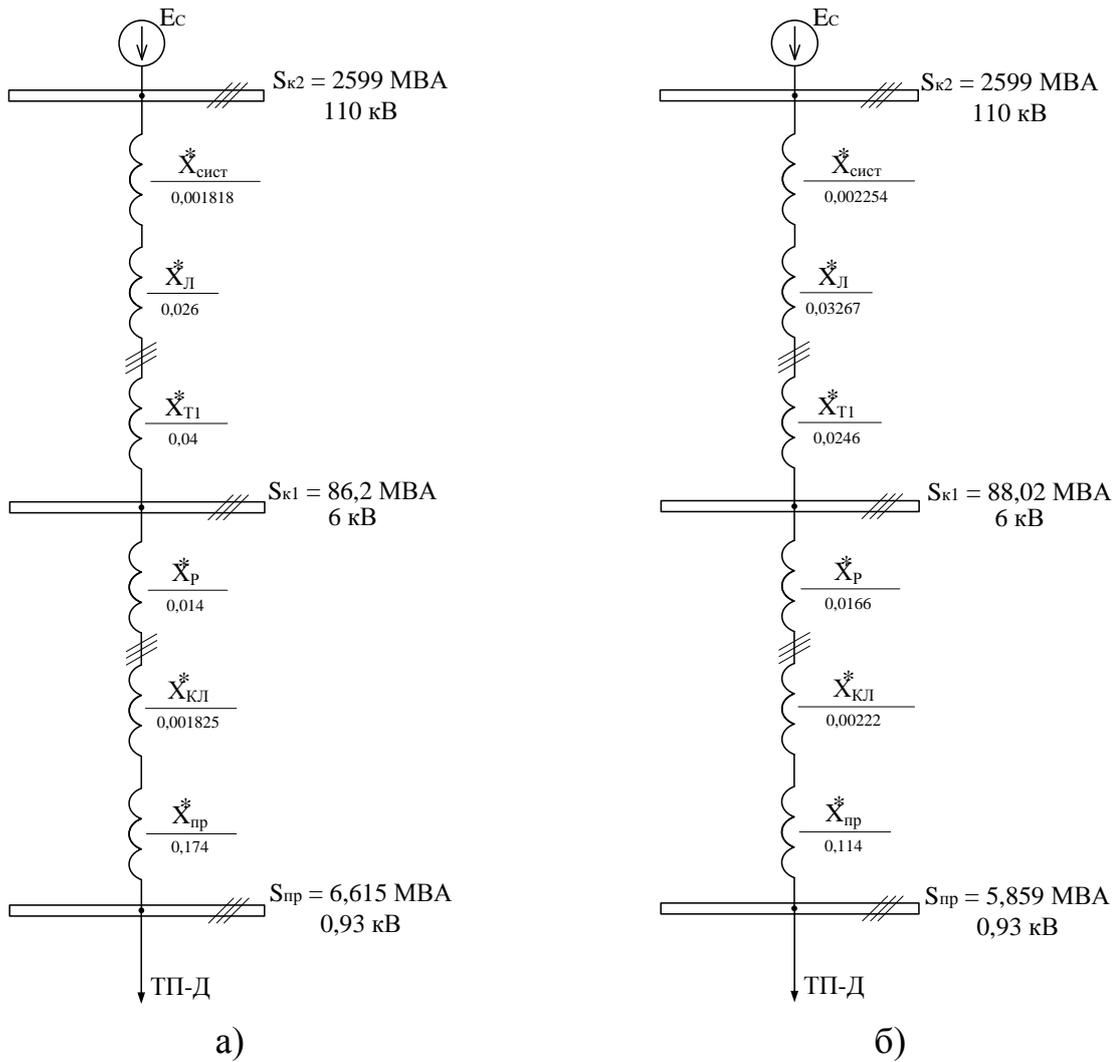


Рисунок 2.13. Схемы замещения высоковольтных рудничных систем электроснабжения:
 а – скиповой ПУ; б – клетевой ПУ

На схемах замещения (рисунок 2.13) приняты следующие обозначения: E_C – ЭДС системы; $S_{к2}$ – мощность КЗ на шинах 110 кВ, МВА; $S_{к1}$ – мощность КЗ на шинах 6 кВ, МВА; $S_{\text{пр}}$ – мощность преобразователя, МВА; $X_{\text{сист}}^*$ – реактивное сопротивление системы, о.е.; $X_{\text{Л}}^*$ – реактивное сопротивление воздушной линии 110 кВ, о.е.; $X_{\text{Т1}}^*$ – реактивное сопротивление силового трансформатора, о.е.; $X_{\text{Р}}^*$ – реактивное сопротивление реактора, о.е.; $X_{\text{КЛ}}^*$ – реактивное сопротивление кабельной линии 6 кВ, о.е.; $X_{\text{пр}}^*$ – индуктивное сопротивление цепи преобразователя (с учетом согласующего трансформатора), о.е. Расчетные значения указаны на схемах замещения и приведены к мощности преобразователя.

Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения высоковольтной рудничной сети при работе тиристорных преобразователей определялся по формуле [96]:

$$K_{U_{расч}} = x_c \cdot \sqrt{\frac{3}{\pi} \cdot \frac{\sin \varphi}{x_c + x_{np}} - \frac{9}{\pi^2}}, \quad (2.7)$$

где x_c – эквивалентное реактивное сопротивление системы в относительных единицах, приведенное к мощности преобразователя; x_{np} – индуктивное сопротивление цепи преобразователя в относительных единицах, приведенное к мощности преобразователя (сопротивление от точки возникновения коммутационных КЗ до точки, в которой определяется $K_{U_{расч}}$); φ – угол сдвига между первой гармоникой переменного напряжения, приложенного к преобразователю, и первой гармоникой тока, потребляемого преобразователем.

Эквивалентное реактивное сопротивление системы и индуктивное сопротивление цепи преобразователя [96]:

$$x_c = \frac{S_{np}}{S_k}; \quad x_{np} = \frac{u_{K\%}}{100} \cdot \left(1 + \frac{K_p}{4}\right) \cdot \frac{S_{np}}{S_{Tnp}}, \quad (2.8)$$

где S_{np} – мощность преобразователя; S_k – мощность КЗ в точке, в которой определяется $K_{U_{расч}}$; S_{Tnp} – номинальная мощность преобразовательного трансформатора; K_p – коэффициент расщепления обмоток этого трансформатора. Значение коэффициента K_p определялось исходя из количества фаз выпрямителя и параметров питающего трансформатора. Для 12-пульсной схемы выпрямления значение коэффициента $K_p = 0-4$ для двухобмоточного трансформатора. В случае если обмотки трансформатора не имеют магнитной связи или преобразователь запитан от двух трансформаторов с разными схемами соединения, коэффициент $K_p = 4$.

Значение угла сдвига между первой гармоникой переменного напряжения и первой гармоникой тока, потребляемого преобразователем φ с учетом угла коммутации γ [96]:

$$\varphi = \alpha + \frac{1}{2} \gamma. \quad (2.9)$$

Угол коммутации γ [115]:

$$\gamma = \left[\arccos \left(\cos \alpha - \frac{x_a \cdot I_d}{\sqrt{2} \cdot E_2 \cdot \sin \left(\frac{\pi}{m} \right)} \right) \right] - \alpha, \quad (2.10)$$

где x_a – анодная индуктивность (индуктивное сопротивление) трансформатора, Ом; I_d – номинальный ток преобразователя, А; E_2 – ЭДС вторичной обмотки трансформатора, В; m – число фаз преобразователя; α – угол управления.

Анодная индуктивность трансформатора [115]:

$$x_a = \frac{u_k [\%] \cdot U_{\text{ИНОМ}}}{100 \cdot K_T^2 \cdot I_{\text{ИНОМ}}}. \quad (2.11)$$

Расчет значений суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения выполнен для углов управления в диапазоне от $\alpha = 54^\circ$ до $\alpha = 88^\circ$ как при работе тиристорных преобразователей подъемных двигателей. Результаты расчета суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения в высоковольтных системах электроснабжения скиповой и клетевой ПУ при изменяющейся нагрузке преобразователей и различных углах управления представлены в таблице 2.12.

Таблица 2.12 – Результаты расчета суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения в высоковольтной рудничной сети при различных углах управления

| Скиповая ПУ | | | | | | Клетевая ПУ | | | | | |
|-------------|---------------------|---------------------|----------------------|-----------|---------------------------|-------------|---------------------|---------------------|----------------------|-----------|---------------------------|
| Время, с | α , град. | γ , град. | φ , град. | I_d , А | $K_{\text{Урасч}}$, % | Время, с | α , град. | γ , град. | φ , град. | I_d , А | $K_{\text{Урасч}}$, % |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 19 | 84,8 | 9,27 | 89,43 | 2600 | 5,7 | 9 | 87,22 | 7,37 | 90,90 | 3200 | 6,4 |
| 21 | 79,6 | 12,88 | 86,04 | 3600 | 7,0 | 21 | 79,6 | 7,83 | 83,52 | 3380 | 6,7 |
| 23 | 73,3 | 13,59 | 80,09 | 3750 | 8,8 | 24 | 70,15 | 9,29 | 74,79 | 3890 | 9,4 |
| 26 | 63,85 | 14,31 | 71,01 | 3790 | 10,1 | 25 | 67,0 | 11,76 | 72,88 | 4875 | 16,2 |
| 28 | 61,3 | 10,53 | 66,57 | 2710 | 6,5 | 26 | 63,86 | 12,15 | 69,93 | 4950 | 17,1 |
| 30 | 59,5 | 9,65 | 64,33 | 2440 | 3,9 | 27 | 62,24 | 10,66 | 67,57 | 4275 | 13,5 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|-----|-------|------|-------|------|-----|-----|-------|------|-------|------|------|
| 33 | 56,8 | 8,39 | 61,0 | 2060 | 3,3 | 30 | 59,53 | 9,63 | 64,35 | 3770 | 10,7 |
| 35 | 55,25 | 7,16 | 58,83 | 1720 | 2,7 | 33 | 56,81 | 6,95 | 60,28 | 2620 | 5,4 |
| 122 | 80,87 | 4,75 | 83,24 | 1324 | 3,5 | 37 | 55,12 | 6,18 | 58,21 | 2280 | 4,6 |
| 159 | 75,19 | 7,75 | 79,06 | 2135 | 5,3 | 123 | 58,25 | 8,62 | 62,56 | 3320 | 6,9 |

В результате расчета суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения в высоковольтной рудничной сети максимальное значение коэффициента для сети, питающей скиповую ПУ, составило $K_{Урасч} = 10,1 \%$, для сети, питающей клетевую ПУ – $K_{Урасч} = 17,1 \%$.

Расчет высших гармонических составляющих тока, генерируемых 12-пульсными тиристорными преобразователями, производился с помощью коэффициентов разложения кривой первичного тока в ряд Фурье [116]:

$$I_{na} = \frac{2 \cdot \sqrt{3} \cdot E_m}{n \cdot \pi \cdot X_k} \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi}{3}\right) \cdot \left[\begin{aligned} &\left(\frac{1}{n+1}\right) \cdot \sin\left((n+1) \cdot \frac{\gamma}{2}\right) \cdot \sin((n+1) \cdot \psi) - \\ &-\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sin\left((n-1) \cdot \frac{\gamma}{2}\right) \cdot \sin((n-1) \cdot \psi) \end{aligned} \right], \quad (2.12)$$

$$I_{np} = \frac{2 \cdot \sqrt{3} \cdot E_m}{n \cdot \pi \cdot X_k} \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi}{3}\right) \cdot \left[\begin{aligned} &-\left(\frac{1}{n+1}\right) \cdot \sin\left((n+1) \cdot \frac{\gamma}{2}\right) \cdot \cos((n+1) \cdot \psi) + \\ &+\left(\frac{1}{n-1}\right) \cdot \sin\left((n-1) \cdot \frac{\gamma}{2}\right) \cdot \cos((n-1) \cdot \psi) \end{aligned} \right], \quad (2.13)$$

где E_m – амплитуда ЭДС питающей сети, В; n – номер гармоники; γ – угол коммутации; ψ – угол управления с учетом коммутации; X_k – индуктивное сопротивление контура коммутации, приведенное к мощности преобразователя.

Для первой гармоники [116]:

$$I_{1a} = \frac{3 \cdot E_m}{2 \cdot \pi \cdot X_k} \cdot \sin \gamma \cdot \sin 2\psi, \quad I_{1p} = \frac{3 \cdot E_m}{2 \cdot \pi \cdot X_k} \cdot (\gamma - \sin \gamma \cdot \cos 2\psi). \quad (2.14)$$

Значение тока n -й гармоники [113]:

$$I_n = \sqrt{I_{na}^2 + I_{np}^2}. \quad (2.15)$$

Расчет гармонических составляющих тока выполнялся с учетом угла коммутации γ , который определялся по формуле (2.10) [115].

Расчет гармонических составляющих тока выполнен для таких же углов управления, что и при имитационном моделировании. Значение угла управления с учетом угла коммутации ψ [96]:

$$\psi = \alpha + \frac{1}{2}\gamma. \quad (2.16)$$

Действующее значение высшей гармоники напряжения в любой точке питающей сети при работе преобразователя с любой последовательностью чередования фаз выпрямления [96]:

$$U_n = \frac{m}{\pi \cdot n} \cdot U_{\text{л}} \cdot \frac{x_c^*}{x_c + x_{np}^*} \cdot \sin \varphi \cdot \sin \left(\frac{3 \cdot n \cdot x_{\Sigma}^*}{m \cdot \sin \varphi} \right), \quad (2.17)$$

где $U_{\text{л}}$ – действующее значение питающего линейного напряжения, В; x_{Σ}^* – индуктивное сопротивление цепи коммутации.

Расчет высших гармонических составляющих тока и напряжения выполнялся для наиболее выраженных 11, 13, 23, 25, 35 и 37-й гармоник в соответствии со схемами замещения систем электроснабжения скиповой и клетевой ПУ, представленными на рисунке 2.13.

Результаты расчета коэффициентов ВГ составляющих токов и напряжений при некоторых углах управления представлены в таблицах 2.13, 2.14, а также в виде гистограмм на рисунке 2.14. Гистограммы на рисунке 2.14 представлены для углов управления $\alpha = 73,3^\circ$ и $\alpha = 63,85^\circ$ (скиповая ПУ) и $\alpha = 70,15^\circ$ и $\alpha = 63,86^\circ$ (клетевая ПУ), при которых якорные токи и токи в высоковольтной сети имели максимальные значения, а мощность преобразователей была наиболее близка к номинальной.

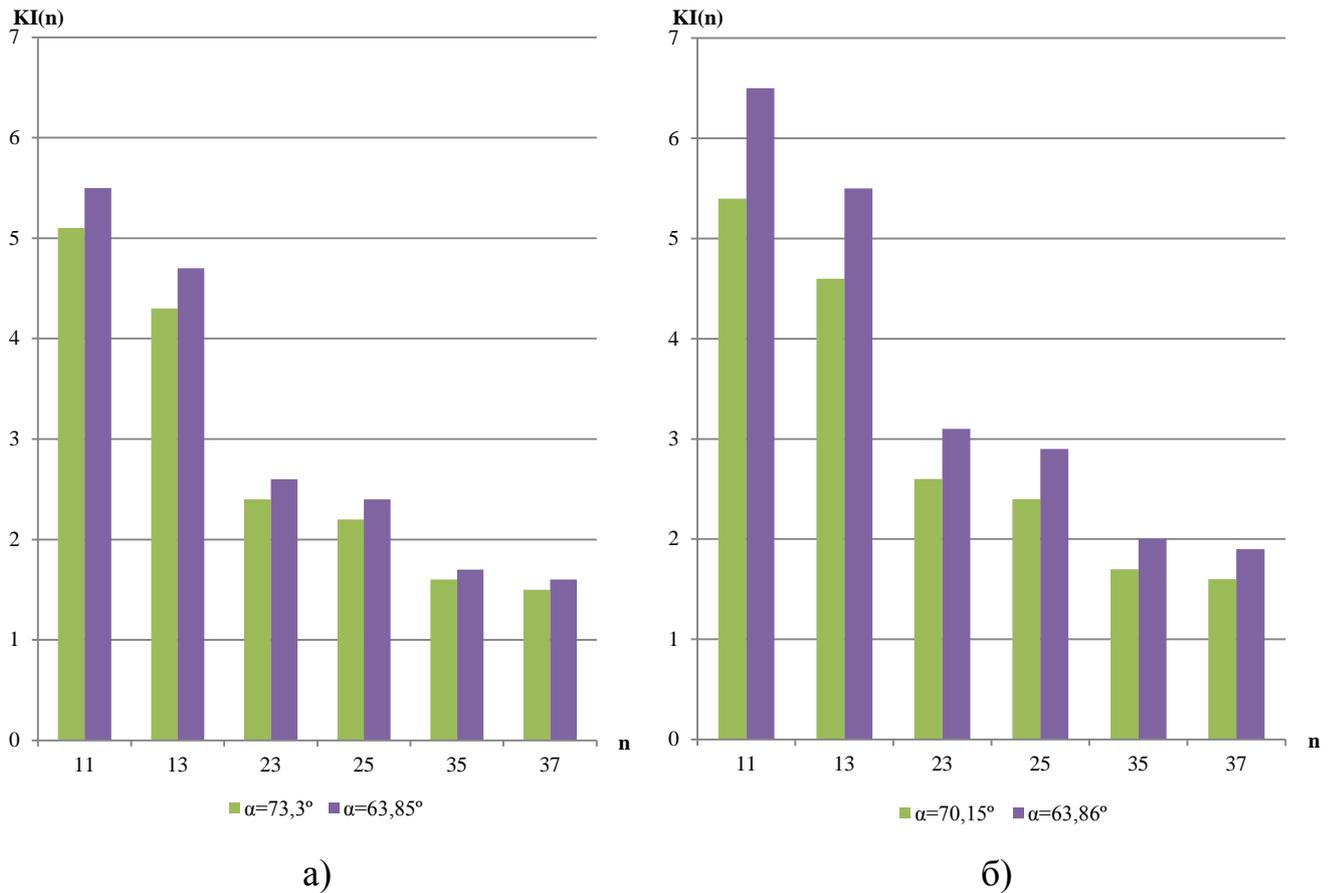


Рисунок 2.14. Гистограммы коэффициентов ВГ составляющих токов
в высоковольтной системе электроснабжения:
a – скиповой ПУ; *б* – клетевой ПУ

Таблица 2.13 – Результаты расчета режимов и показателей ЭМС
по напряжению в высоковольтной рудничной сети

| Время, с | I, А | I _я , А | K _U , % | K _{U(11)} , % | K _{U(13)} , % | K _{U(23)} , % | K _{U(25)} , % | K _{U(35)} , % | K _{U(37)} , % | α , град. |
|-------------|------|--------------------|--------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| Скиповая ПУ | | | | | | | | | | |
| 00:19 | 238 | 2600 | 5,7 | 3,03 | 2,9 | 2,44 | 2,21 | 1,58 | 1,28 | 84,8 |
| 00:20 | 318 | 3550 | 6,9 | 3,53 | 3,4 | 2,94 | 2,71 | 2,08 | 1,78 | 82,3 |
| 00:21 | 326 | 3600 | 7,0 | 3,59 | 3,46 | 3 | 2,77 | 2,14 | 1,84 | 79,6 |
| 00:22 | 337 | 3720 | 8,67 | 4,27 | 4,14 | 3,68 | 3,45 | 2,82 | 2,52 | 76,45 |
| 00:23 | 330 | 3750 | 8,8 | 4,34 | 4,21 | 3,75 | 3,52 | 2,89 | 2,59 | 73,3 |
| 00:24 | 340 | 3770 | 9,42 | 4,58 | 4,45 | 3,99 | 3,76 | 3,13 | 2,83 | 70,2 |

Продолжение таблицы 2.13

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|-------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 00:25 | 343 | 3780 | 9,92 | 4,79 | 4,66 | 4,2 | 3,97 | 3,34 | 3,04 | 67 |
| 00:26 | 345 | 3790 | 10,1 | 4,4 | 4,35 | 3,96 | 3,86 | 3,27 | 3,14 | 63,85 |
| 00:27 | 284 | 3030 | 7,0 | 3,57 | 3,44 | 2,98 | 2,75 | 2,12 | 1,82 | 62,25 |
| 00:28 | 258 | 2710 | 6,5 | 3,34 | 3,21 | 2,75 | 2,52 | 1,89 | 1,59 | 61,3 |
| Клетевая ПУ | | | | | | | | | | |
| 00:15 | 306 | 2630 | 2,4 | 1,59 | 1,39 | 0,89 | 0,69 | 0,19 | 0,09 | 87,06 |
| 00:18 | 289 | 2530 | 1,35 | 1,15 | 0,65 | 0,45 | 0,15 | 0,15 | 1,35 | 87,05 |
| 00:21 | 397 | 3380 | 6,7 | 3,81 | 3,68 | 2,79 | 2,56 | 1,24 | 0,95 | 79,6 |
| 00:24 | 454 | 3890 | 9,4 | 4,56 | 4,43 | 3,97 | 3,74 | 3,11 | 2,81 | 70,15 |
| 00:25 | 502 | 4875 | 16,2 | 7,79 | 7,66 | 6,77 | 6,54 | 5,22 | 4,93 | 67,0 |
| 00:26 | 511 | 4950 | 17,1 | 8,19 | 8,06 | 7,17 | 6,94 | 5,62 | 5,33 | 63,86 |
| 00:27 | 487 | 4275 | 13,3 | 5,95 | 5,89 | 5,47 | 5,36 | 4,69 | 4,54 | 62,24 |
| 00:30 | 439 | 3770 | 10,7 | 5,53 | 5,4 | 4,51 | 4,28 | 2,96 | 2,67 | 59,53 |
| 00:33 | 295 | 2620 | 5,4 | 3,22 | 3,09 | 2,2 | 1,97 | 0,65 | 0,36 | 56,81 |
| 00:35 | 262 | 2350 | 3,21 | 2,07 | 1,67 | 1,37 | 1,07 | 0,37 | 0,27 | 55,22 |

Таблица 2.14 – Результаты расчета режимов и показателей ЭМС
по току в высоковольтной рудничной сети

| Время, с | I, А | I _я , А | K _I , % | K _{I(11)} , % | K _{I(13)} , % | K _{I(23)} , % | K _{I(25)} , % | K _{I(35)} , % | K _{I(37)} , % | α, град. |
|-------------|------|--------------------|--------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|----------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| Скиповая ПУ | | | | | | | | | | |
| 00:19 | 238 | 2600 | 4,85 | 3,2 | 2,7 | 1,5 | 1,4 | 1 | 0,9 | 84,8 |
| 00:20 | 318 | 3550 | 7,09 | 4,65 | 3,94 | 2,22 | 2,05 | 1,46 | 1,38 | 82,3 |
| 00:21 | 326 | 3600 | 7,01 | 4,59 | 3,77 | 2,4 | 2,05 | 1,58 | 1,21 | 79,6 |
| 00:22 | 337 | 3720 | 7,39 | 4,85 | 4,1 | 2,32 | 2,13 | 1,52 | 1,44 | 76,45 |
| 00:23 | 330 | 3750 | 7,74 | 5,1 | 4,3 | 2,4 | 2,2 | 1,6 | 1,5 | 73,3 |
| 00:24 | 340 | 3770 | 7,91 | 5,19 | 4,39 | 2,48 | 2,28 | 1,63 | 1,54 | 70,2 |
| 00:25 | 343 | 3780 | 8,07 | 5,29 | 4,48 | 2,53 | 2,33 | 1,66 | 1,57 | 67 |
| 00:26 | 345 | 3790 | 8,39 | 5,5 | 4,7 | 2,6 | 2,4 | 1,7 | 1,6 | 63,85 |
| 00:27 | 284 | 3030 | 6,72 | 4,4 | 3,73 | 2,11 | 1,94 | 1,38 | 1,31 | 62,25 |

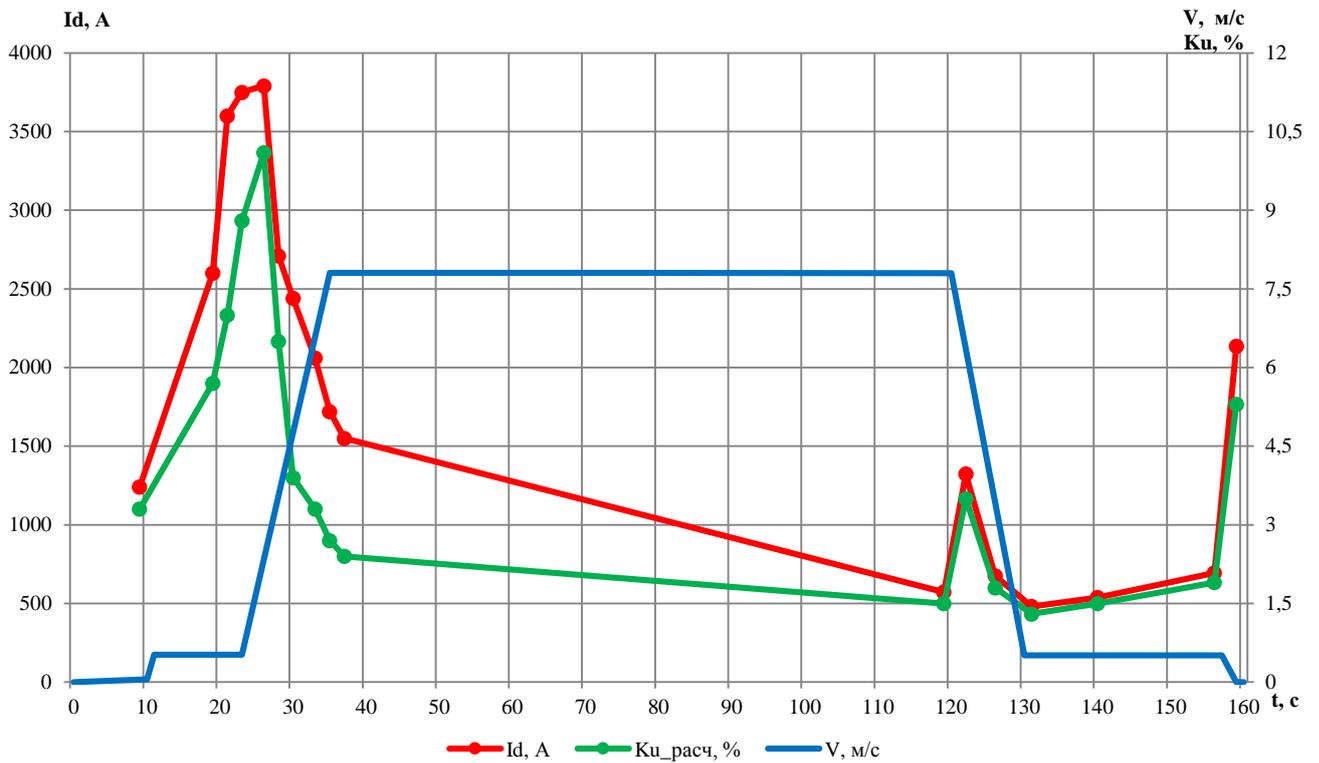
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|-------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 00:28 | 258 | 2710 | 5,95 | 3,9 | 3,3 | 1,9 | 1,7 | 1,2 | 1,2 | 61,3 |
| Клетевая ПУ | | | | | | | | | | |
| 00:15 | 306 | 2630 | 1,45 | 0,95 | 0,8 | 0,45 | 0,42 | 0,3 | 0,28 | 87,06 |
| 00:18 | 289 | 2530 | 1,12 | 0,74 | 0,62 | 0,35 | 0,32 | 0,23 | 0,22 | 87,05 |
| 00:21 | 397 | 3380 | 4,34 | 2,84 | 2,41 | 1,36 | 1,25 | 0,89 | 0,85 | 79,6 |
| 00:24 | 454 | 3890 | 6,11 | 3,69 | 3,55 | 2,14 | 1,75 | 1,32 | 1,34 | 70,15 |
| 00:25 | 502 | 4875 | 8,26 | 5,4 | 4,6 | 2,6 | 2,4 | 1,7 | 1,6 | 67,0 |
| 00:26 | 511 | 4950 | 9,91 | 6,5 | 5,5 | 3,1 | 2,9 | 2 | 1,9 | 63,86 |
| 00:27 | 487 | 4275 | 7,03 | 4,6 | 3,9 | 2,2 | 2 | 1,5 | 1,4 | 62,24 |
| 00:30 | 439 | 3770 | 6,17 | 4,04 | 3,42 | 1,93 | 1,78 | 1,27 | 1,2 | 59,53 |
| 00:33 | 295 | 2620 | 3,43 | 2,25 | 1,9 | 1,08 | 0,99 | 0,71 | 0,67 | 56,81 |
| 00:35 | 262 | 2350 | 2,67 | 1,75 | 1,48 | 0,84 | 0,77 | 0,55 | 0,52 | 55,22 |

Максимальные значения коэффициентов ВГ составляющих токов наблюдаются для 11, 13, 23 и 25-й гармоник. Проведённый аналитический расчет показывает, что уровень гармонических составляющих токов и напряжений в высоковольтной рудничной сети значительный. Расчетные значения сопоставимы с результатами экспериментальных исследований и имитационного моделирования.

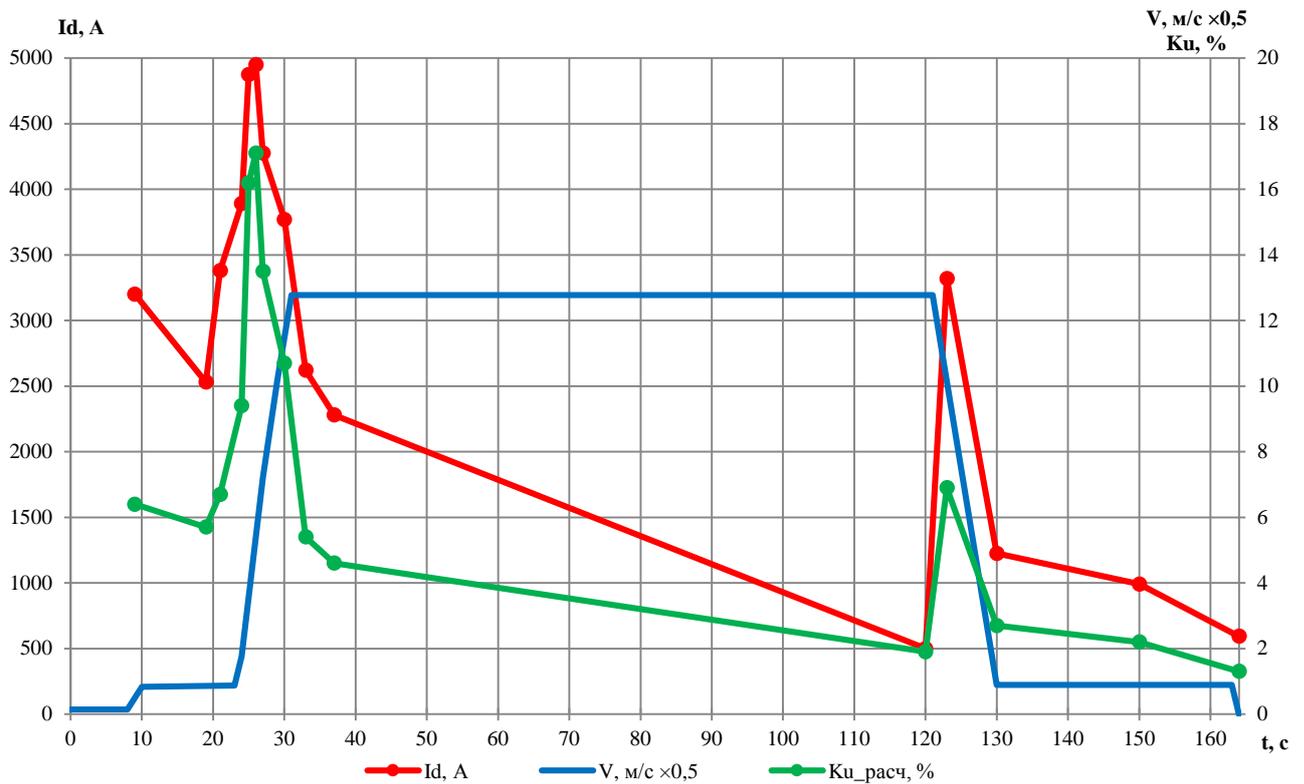
Результаты аналитических расчетов суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения сопоставимы с результатами экспериментальных исследований.

Величины суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения в высоковольтной рудничной сети, полученных аналитически, принимают высокие значения и превышают установленные нормы [97].

Полученные результаты иллюстрируют высокую степень корреляции результатов экспериментальных исследований, имитационного моделирования и аналитических расчетов (рисунок 2.15, таблица 2.15).



а)



б)

Рисунок 2.15. Графики изменения якорного тока и скорости с наложением суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения при аналитических расчетах:

a – для скиповой ПУ; *б* – для клетевой ПУ

Таблица 2.15 – Сравнение результатов экспериментальных исследований, имитационного моделирования и аналитических расчетов

| Время | U, В | I _я , А | K _U , % | K _{U(11)} , % | K _{U(13)} , % | K _{U(23)} , % | K _{U(25)} , % | K _{U(35)} , % | K _{U(37)} , % | α , град. |
|---------------------------------|---------|--------------------|--------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------|
| Скиповая ПУ | | | | | | | | | | |
| 18:14:00* | 6211,02 | 3160 | 11,32 | 4,99 | 4,47 | 4,1 | 4,33 | 3,56 | 4,81 | 67,77 |
| 00:00:26** | 6008 | 3790 | 9,94 | 5,41 | 7,53 | 2,47 | 1,58 | 0,95 | 0,77 | 63,85 |
| 00:00:26*** | – | 3790 | 10,1 | 4,4 | 4,35 | 3,96 | 3,86 | 3,27 | 3,14 | 63,85 |
| Клетевая ПУ | | | | | | | | | | |
| 17:44:15 | 6157,56 | 4496 | 17,87 | 10,07 | 12,24 | 5,61 | 4,13 | 2 | 2,08 | 68,17 |
| 00:00:26 | 5794 | 4950 | 17,07 | 8,90 | 13,08 | 4,33 | 2,83 | 1,65 | 1,35 | 63,86 |
| 00:00:26 | – | 4950 | 17,1 | 8,19 | 8,06 | 7,17 | 6,94 | 5,62 | 5,33 | 63,86 |
| <i>Продолжение таблицы 2.15</i> | | | | | | | | | | |
| Время | I, А | I _я , А | K _I , % | K _{I(11)} , % | K _{I(13)} , % | K _{I(23)} , % | K _{I(25)} , % | K _{I(35)} , % | K _{I(37)} , % | α , град. |
| Скиповая ПУ | | | | | | | | | | |
| 18:14 | 373 | 3160 | 8,15 | 5,73 | 4,46 | 2,08 | 2,2 | 0,95 | 1,21 | 67,77 |
| 00:00:26 | 348 | 3790 | 8,25 | 5,18 | 4,03 | 2,56 | 2,28 | 1,63 | 1,52 | 63,85 |
| 00:00:26 | 345 | 3790 | 8,39 | 5,5 | 4,7 | 2,6 | 2,4 | 1,7 | 1,6 | 63,85 |
| Клетевая ПУ | | | | | | | | | | |
| 17:44:15 | 447 | 4496 | 9,37 | 7,18 | 2,83 | 2,92 | 1,08 | 1,38 | 0,81 | 68,17 |
| 00:00:26 | 585 | 4950 | 8,94 | 5,65 | 4,43 | 2,8 | 2,49 | 1,78 | 1,64 | 63,86 |
| 00:00:26 | 511 | 4950 | 9,91 | 6,5 | 5,5 | 3,1 | 2,9 | 2 | 1,9 | 63,86 |

Примечание: * – результаты экспериментальных исследований, ** – результаты имитационного моделирования, *** – результаты аналитических расчетов.

Результаты аналитических расчетов, имитационного моделирования и экспериментальных исследований по гармоническим составляющим токов и напряжений в достаточной степени близки и имеют высокую степень корреляции. Отличия параметров по несинусоидальности питающего напряжения и тока в высоковольтной системе электроснабжения составили не более 12 %. Например, максимальное значение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения в сети 6 кВ скиповой ПУ при моделировании составило $K_U = 9,94$ %, при измерениях – $K_U = 11,32$ %, при расчетах – $K_U = 10,1$ %, что составляет отли-

чие значений на 10–12 % (таблица 2.12). Максимальные значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих тока в системе электроснабжения клетевой ПУ при моделировании, измерениях и аналитических расчетах отличаются не более чем на 11 % (8,94 %, 9,37 % и 9,91 % соответственно). Погрешность между результатами обусловлена различными причинами, такими, как использование некоторых ограничений и допущений при моделировании и расчетах, неучёт различных факторов, рассогласование по времени, различия по нагрузке между режимами, округление результатов.

Результаты экспериментальных исследований, имитационного моделирования, аналитических расчетов подтвердили наличие гармоник тока и напряжения 11, 13, 23, 25, 35 и 37-го порядков в высоковольтной системе электроснабжения подъемных установок. При этом достоверность результатов подтверждается хорошей корреляцией между собой экспериментальными исследованиями, имитационного моделирования и аналитическими расчетами, степень расхождения не превысила 10–12 %.

Выводы

1. Экспериментально подтверждено наличие высших гармонических составляющих токов и напряжений в высоковольтной рудничной сети. Установлено, что наиболее выраженными являются 11, 13, 23, 25, 35 и 37-я гармоники токов и напряжений. Суммарные коэффициенты гармонических составляющих токов и напряжений в высоковольтной рудничной сети достигают в среднем соответственно $K_I = 8\text{--}10\%$ и $K_U = 12\text{--}17\%$.

2. Выполнено имитационное моделирование систем электроснабжения подъемных установок в системе Matlab с пакетом расширений Simulink и библиотекой SimPowerSystems. При этом модели полностью соответствуют реальным рудничным системам электроснабжения с учетом мощных нелинейных электроприемников. Модели электроприводов систем ТП – Д построены с учетом реальных замкнутых систем управления, настроенных на модульные оптимумы, что

позволило смоделировать динамические режимы при движении подъемных сосудов.

3. Аналитические расчеты суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения и токов высших гармоник токов в сочетании с результатами экспериментов и имитационного моделирования подтвердили наличие высших гармоник токов и напряжений в рудничных высоковольтных сетях, питающих мощные тиристорные электроприводы подъемных установок, выполненных по системе ТП – Д.

ГЛАВА 3. ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ ВЫСШИХ ГАРМОНИК ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ В ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ РУДНИЧНЫХ СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

В третьей главе произведена идентификация параметров и определение вероятностных характеристик случайных процессов изменения нагрузок в высоковольтной рудничной системе электроснабжения с целью выявления наиболее вероятного диапазона значений токов нагрузки и токов искажения. Выполнена оценка дополнительных потерь мощности в высоковольтной рудничной сети при несинусоидальных режимах. Произведена оценка частотных характеристик, обоснование и расчет параметров ФКУ для компенсации высших гармоник токов и напряжений в высоковольтной рудничной сети.

3.1. Идентификация параметров и определение вероятностных характеристик случайных процессов изменения графиков нагрузок рудничных электроприемников

В соответствии с технологическим процессом добычи и транспортировки руды на примере Яковлевского рудника Белгородской области в течение суток на графиках электрических нагрузок можно выделить четыре характерных периода времени загрузки, подъема и разгрузки руды скиповым подъемом (рисунок 3.1): 1:00 – 2:30; 5:00 – 6:30; 17:30 – 20:00; 21:00 – 22:30.

Как следует из рисунка 3.1 графики электрических нагрузок представлены тремя реализациями для трех суток работы ПУ рудника. При этом график электрических нагрузок скиповой ПУ носит циклический характер в соответствии с технологическим процессом транспортировки руды.

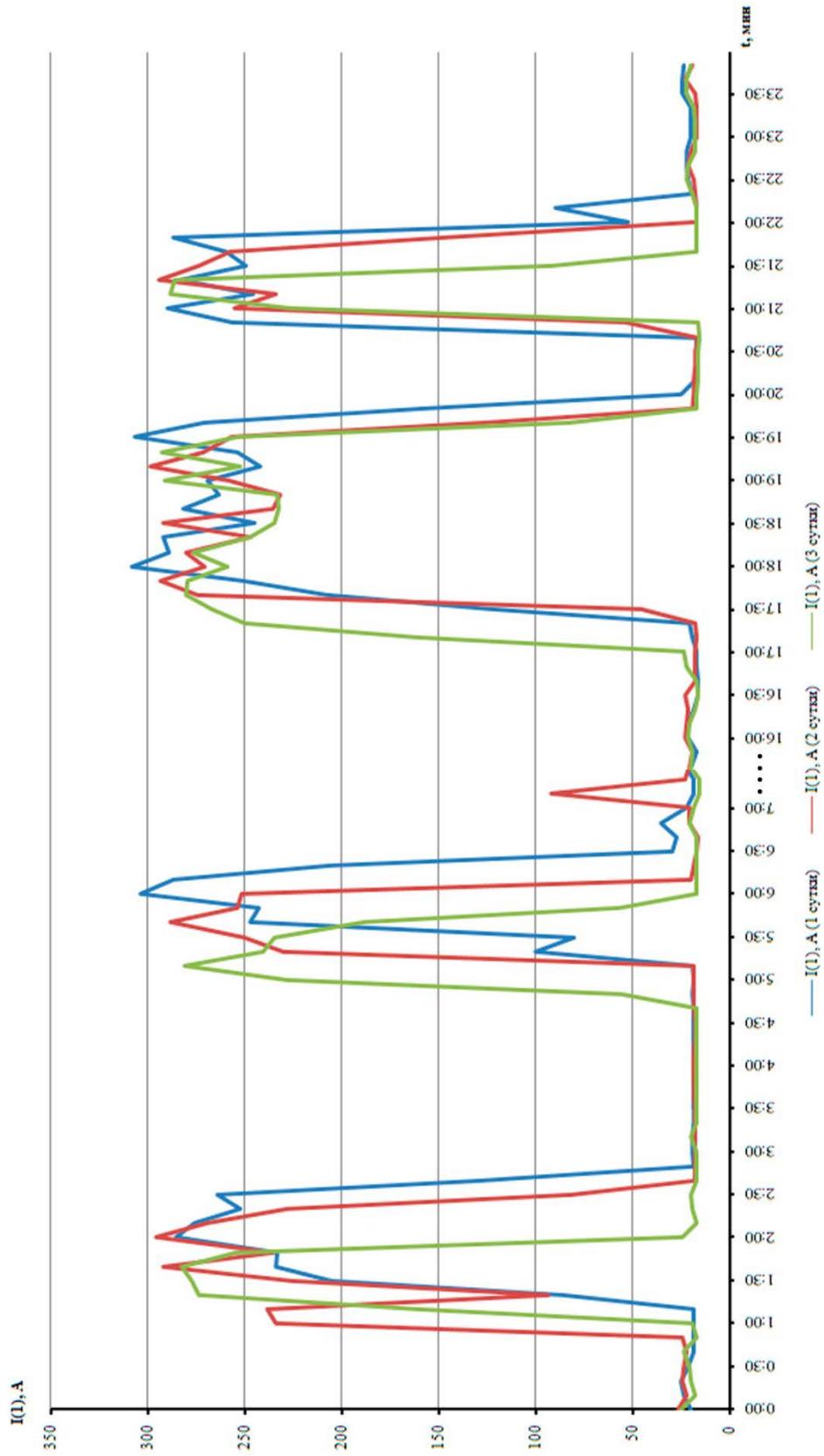


Рисунок 3.1. Суточный график нагрузки по току основной частоты высоковольтной рудничной сети

Аналогичный график электрических нагрузок для клетевой ПУ представлен в приложении В.

Нагрузка в высоковольтной системе электроснабжения носит случайный характер, что связано с загрузкой ПУ, со временем суток. Изменение нагрузки в зависимости от времени относится к случайным процессам. Для исследования и прогнозирования токов нагрузки используется математический аппарат теории случайных процессов [117, 118].

Математическая модель случайного стационарного процесса изменения тока нагрузки может быть представлена в виде соотношения [119]

$$I_{(1)j} = \varphi(t_j) + \Delta_j, \quad (3.1)$$

где $I_{(1)j}$ – величины, отражающие ряд наблюдений ($j = 1, 2, \dots, n$); $\varphi(t_j)$ – некоторая детерминированная функция, отражающая общую тенденцию изменения $I_{(1)j}$ (иногда называется «детерминированная компонента» или «тренд»); Δ_j – случайные отклонения, имеющие место при протекании процесса $I_{(1)j}$. Эту величину можно расценивать как появление ошибки по отношению к тренду $\varphi(t_j)$, благодаря чему процесс и становится случайным.

Случайный процесс представляет собой совокупность случайных функций. Основными характеристиками случайного процесса изменения тока нагрузки являются математическое ожидание $M[I_{(1)}(t_j)]$, дисперсия $D[I_{(1)}(t_j)]$, среднее квадратичное отклонение $\sigma_{I(1)}$, корреляционная функция $K_{I(1)}(t_j, t_f)$ и нормированная корреляционная функция (коэффициент корреляции) $r_{I(1)}(t_j, t_f)$, которые определяются на основании следующих выражений [117–119]:

$$\begin{aligned} M[I_{(1)}(t_j)] &= \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n I_{(1)}(t_j), & D[I_{(1)}(t_j)] &= \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (I_{(1)}(t_j) - M[I_{(1)}(t_j)])^2, \\ \sigma_{I(1)} &= \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (I_{(1)}(t_j) - M[I_{(1)}(t_j)])^2}, & & \\ K_{I(1)}(t_j, t_f) &= M\left[\dot{I}_{(1)}(t_j) \cdot \dot{I}_{(1)}(t_f)\right], & & \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$\overset{\circ}{I}_{(1)}(t_j) = I_{(1)}(t_j) - M[I_{(1)}(t_j)], \quad \overset{\circ}{I}_{(1)}(t_f) = I_{(1)}(t_f) - M[I_{(1)}(t_f)]. \quad (3.3)$$

$$r_{I_{(1)}}(t_j, t_f) = \frac{K_{I_{(1)}}(t_j, t_f)}{\sigma_{I_{(1)}}(t_j) \cdot \sigma_{I_{(1)}}(t_f)}, \quad (3.4)$$

где n – количество сечений случайного процесса; j, f – произвольные моменты времени или реализации; $\overset{\circ}{I}_{(1)}(t_j), \overset{\circ}{I}_{(1)}(t_f)$ – центрированные значения случайной функции для моментов времени или реализаций j и f .

Основанием для расчета числовых характеристик случайных функций случайного процесса служат экспериментальные данные. В качестве примера в таблице 3.1 представлены значения токов нагрузки в высоковольтной системе электроснабжения скиповой ПУ в течение самого загруженного периода за рабочую смену с 17:40 до 19:42.

Таблица 3.1 – Результаты измерений тока основной частоты в функции времени

| Сечение | t_1 | t_2 | t_3 | t_4 | t_5 | t_6 | t_7 | ... | t_{123} |
|-----------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----|--------------------|
| Время, ч, мин, с | 17:40:00 | 17:41:00 | 17:42:00 | 17:43:00 | 17:44:00 | 17:45:00 | 17:46:00 | ... | 19:42:00 |
| Значение функции | $I_{(1)}(t_1)$ | $I_{(1)}(t_2)$ | $I_{(1)}(t_3)$ | $I_{(1)}(t_4)$ | $I_{(1)}(t_5)$ | $I_{(1)}(t_6)$ | $I_{(1)}(t_7)$ | ... | $I_{(1)}(t_{123})$ |
| Реализация 1 $I_{1(1)}$, А | 306,35 | 340,14 | 120,13 | 25,73 | 515,77 | 242,24 | 50,01 | ... | 384,21 |
| Реализация 2 $I_{2(1)}$, А | 291,75 | 354,28 | 146,94 | 500,67 | 231,93 | 21,06 | 274,13 | ... | 98,45 |
| Реализация 3 $I_{3(1)}$, А | 107,50 | 390,38 | 310,29 | 82,67 | 485,97 | 232,72 | 199,44 | ... | 217,02 |

Результаты расчета числовых характеристик случайного процесса для различных сечений приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Результаты расчета числовых характеристик случайного процесса

| Сечение | t_1 | t_2 | t_3 | t_4 | t_5 | t_6 | t_7 | ... | t_{123} |
|-------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----|-----------|
| Время, ч, мин, с | 17:40:00 | 17:41:00 | 17:42:00 | 17:43:00 | 17:44:00 | 17:45:00 | 17:46:00 | ... | 19:42:00 |
| $M[I_{(t_j)}], A$ | 235,20 | 361,60 | 192,45 | 203,02 | 411,23 | 165,34 | 174,53 | ... | 233,23 |
| $D[I_{(t_j)}], A^2$ | 12283,83 | 671,17 | 10594,05 | 67256,37 | 24331,14 | 15635,98 | 13023,86 | ... | 20611,47 |
| $\sigma_{I_{(t_j)}}, A$ | 110,83 | 25,91 | 102,93 | 259,34 | 155,98 | 125,04 | 114,12 | ... | 143,57 |

На рисунках 3.2 – 3.4 представлены графики изменения тока нагрузки и тока искажения, суммарных коэффициентов гармонических составляющих тока и напряжения, токов гармоник в высоковольтной рудничной сети в течение периода работы ПУ за рабочую смену.

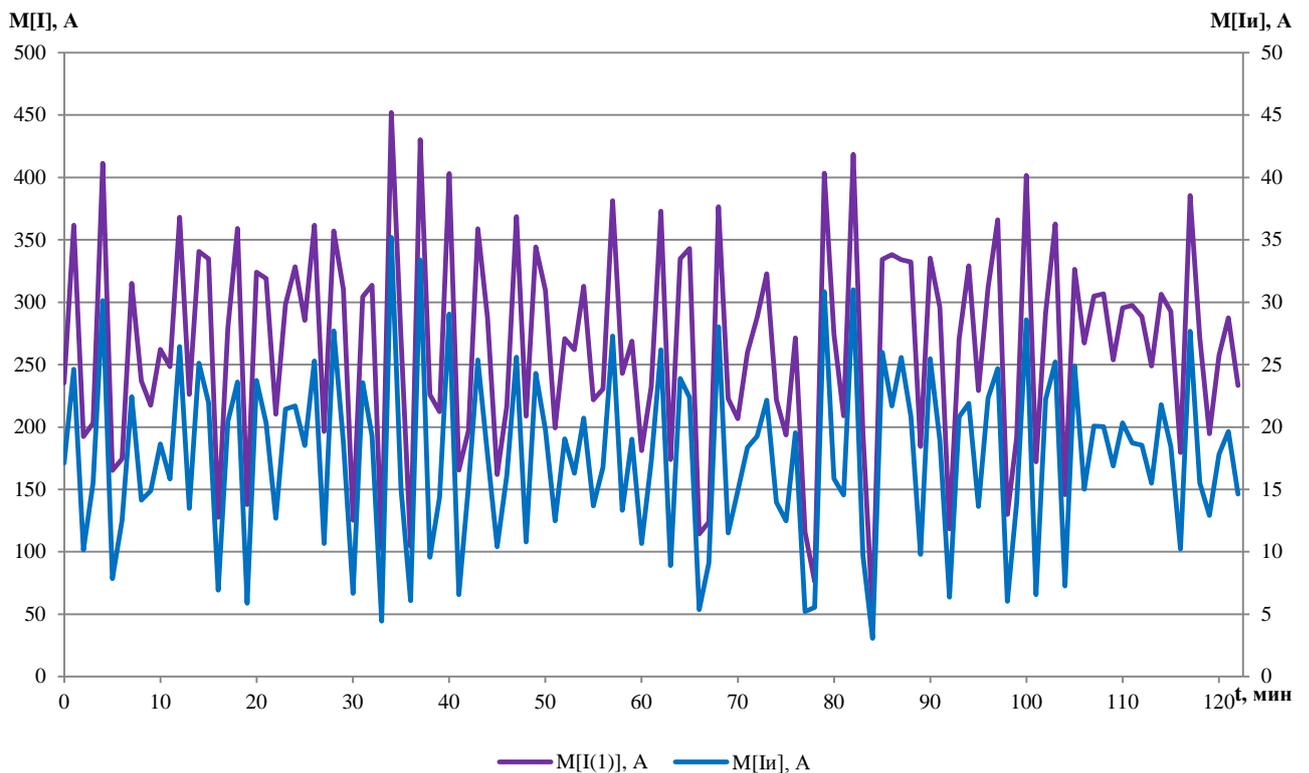


Рисунок 3.2. Графики изменения тока и тока искажения в течение периода работы ПУ

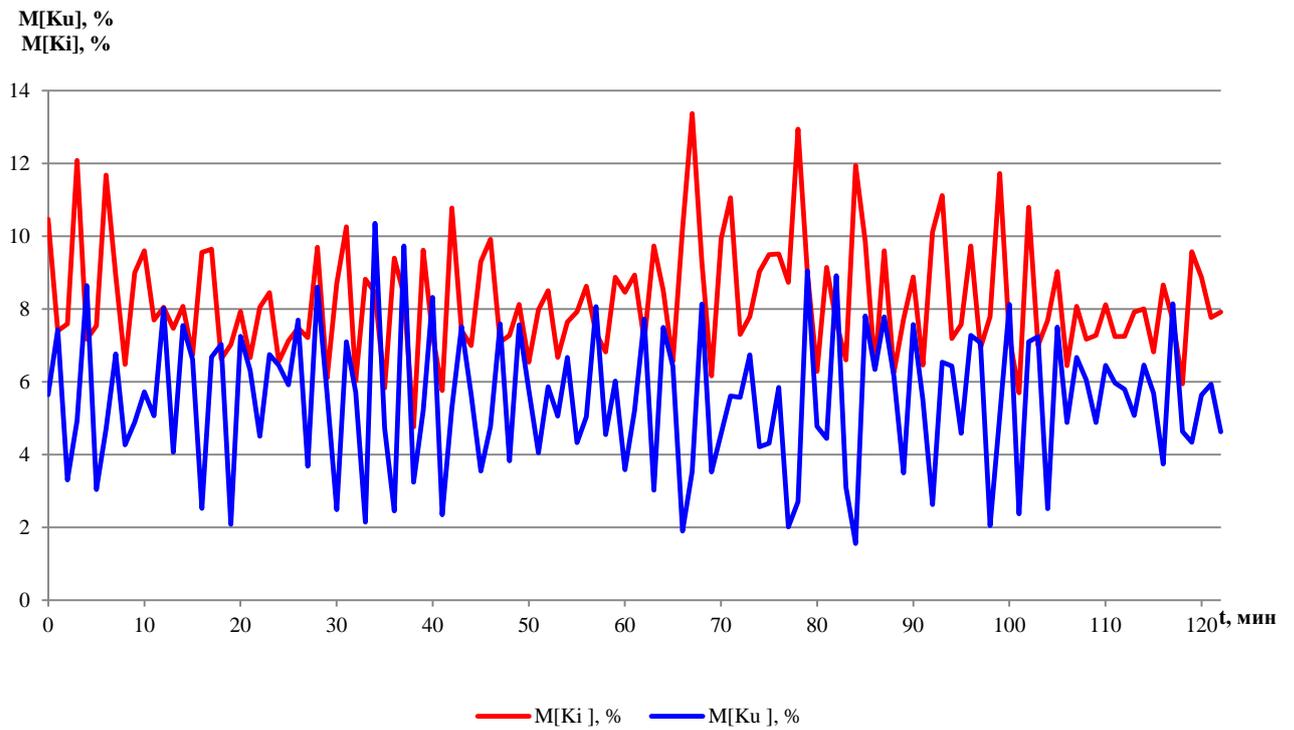


Рисунок 3.3. Графики изменения суммарных коэффициентов гармонических составляющих тока и напряжения в течение периода работы ПУ

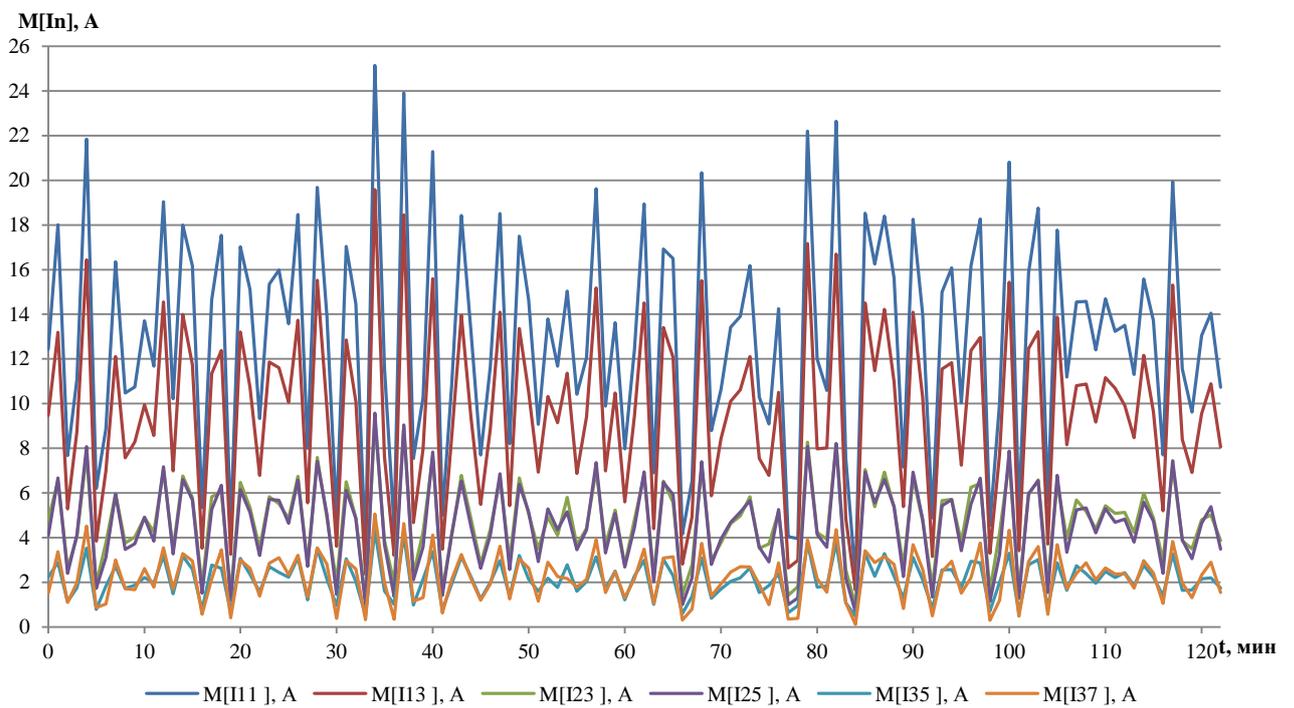


Рисунок 3.4. Графики изменения токов гармоник в течение периода работы ПУ

Нормированная корреляционная функция – это зависимость между возможными парами моментов времени t_j и t_f или реализациями j и f и выборочными корреляционными моментами (таблица 3.3).

Таблица 3.3 – Корреляционная оценка реализаций изменения тока основной частоты с момента начала работы скиповой ПУ с интервалом усреднения 10 мин

| Сечение | t_1 | t_2 | t_3 | t_4 | t_5 | t_6 | t_7 | ... | t_{15} | |
|-------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----|-------------------|---------------------|
| Значение функции | $I_{(1)}(t_1)$ | $I_{(1)}(t_2)$ | $I_{(1)}(t_3)$ | $I_{(1)}(t_4)$ | $I_{(1)}(t_5)$ | $I_{(1)}(t_6)$ | $I_{(1)}(t_7)$ | ... | $I_{(1)}(t_{15})$ | $r_{I_{(1)}}(j, f)$ |
| Реализация 1 $I_{1(1)}, A$ | 20,50 | 122,85 | 207,26 | 250,69 | 307,95 | 289,08 | 291,47 | ... | 270,82 | 0,777 |
| Реализация 2 $I_{2(1)}, A$ | 17,88 | 46,14 | 274,43 | 293,14 | 270,73 | 280,43 | 247,02 | ... | 125,68 | 0,766 |
| Реализация 3 $I_{3(1)}, A$ | 23,10 | 161,20 | 250,42 | 267,10 | 280,27 | 279,97 | 259,00 | ... | 293,15 | 0,906 |

Стационарные случайные процессы протекают во времени приблизительно однородно и имеют вид непрерывных случайных колебаний вокруг некоторого среднего значения, причем ни средняя амплитуда, ни характер этих колебаний не обнаруживают существенных изменений с течением времени. Стационарность процесса заключается в том, что значения случайной функции не зависят от значения начала временного интервала. При исследовании стационарного процесса в качестве начала отсчета можно выбрать любой момент времени. Исследуя стационарный случайный процесс на любом участке времени получают близкие (равные) по величине его вероятностные характеристики [119, 120].

Из стационарных выделяют классы эргодических и неэргодических случайных процессов. У эргодических случайных процессов вероятностные характеристики, определяемые по ансамблю и по одной реализации, совпадают.

Как следует из таблиц 3.2, 3.3 и рисунков 3.2 – 3.4, случайные процессы изменения параметров графиков нагрузок протекают однородно и имеют вид непрерывных случайных колебаний вокруг некоторого среднего значения, а различные реализации графиков нагрузок по току основной частоты имеют высокую корреляцию. Из результатов следует, что изменения параметров графиков нагрузок соответствуют стационарным случайным процессам.

Получена система для определения коэффициентов C_j ($j = 0, 1, \dots, k$). В результате решения системы уравнений определяются искомые коэффициенты аппроксимирующей функции тренда.

Для получения детерминированных функций, отражающих общую тенденцию изменения графиков нагрузок высоковольтной рудничной сети по рассматриваемым параметрам, выполнена их аппроксимация полиномами 6-го порядка. Уравнения трендов получены с помощью стандартных функций программного продукта Microsoft Office Excel.

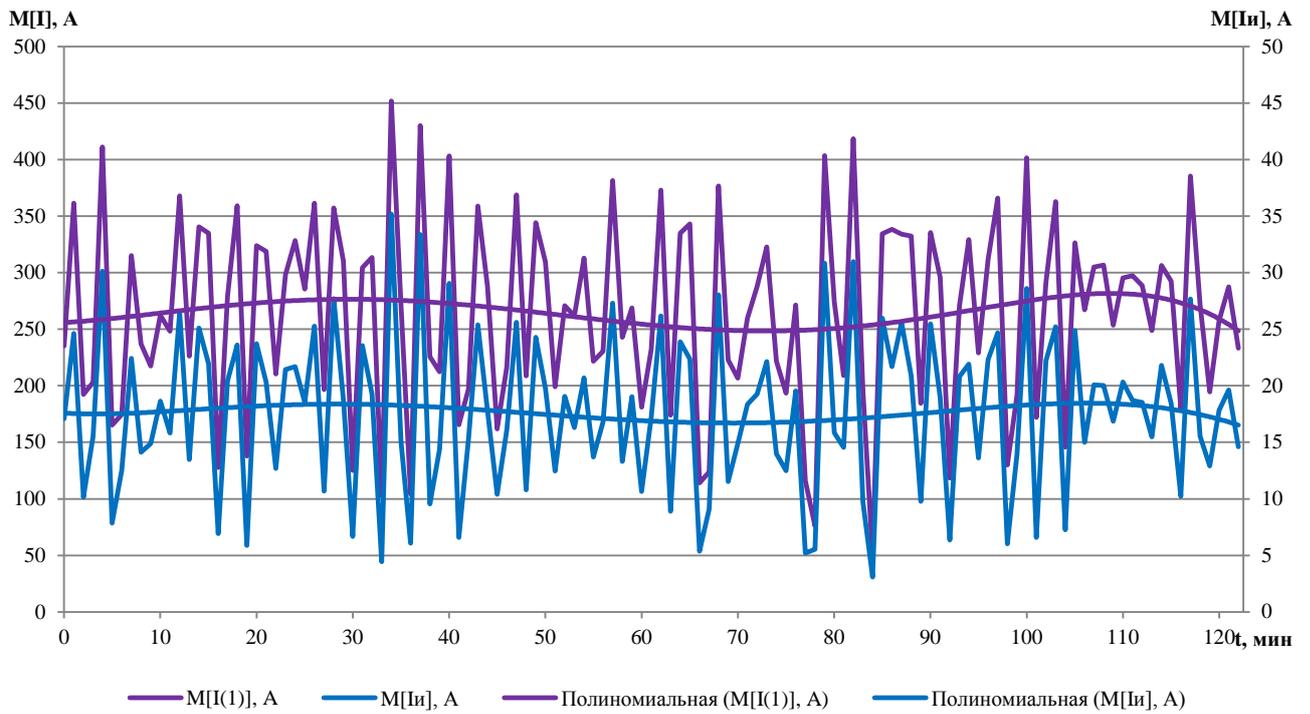
Уравнения трендов тока основной частоты, тока искажения и токов 11, 13, 23, 25, 35 и 37-й гармоник имеют следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{(I)} = -3 \cdot 10^{-10} \cdot t^6 - 6 \cdot 10^{-8} \cdot t^5 + 3 \cdot 10^{-5} \cdot t^4 - 0,0025 \cdot t^3 + 0,0653 \cdot t^2 + 0,3552 \cdot t + 255,5; \\ I_{II} = 6 \cdot 10^{-11} \cdot t^6 - 3 \cdot 10^{-8} \cdot t^5 + 5 \cdot 10^{-6} \cdot t^4 - 0,0004 \cdot t^3 + 0,0107 \cdot t^2 - 0,0745 \cdot t + 17,657; \\ I_{(11)} = 6 \cdot 10^{-11} \cdot t^6 - 3 \cdot 10^{-8} \cdot t^5 + 4 \cdot 10^{-6} \cdot t^4 - 0,0003 \cdot t^3 + 0,0088 \cdot t^2 - 0,0635 \cdot t + 12,928; \\ I_{(13)} = 2 \cdot 10^{-11} \cdot t^6 - 1 \cdot 10^{-8} \cdot t^5 + 2 \cdot 10^{-6} \cdot t^4 - 0,0002 \cdot t^3 + 0,0047 \cdot t^2 - 0,0323 \cdot t + 9,573; \\ I_{(23)} = 2 \cdot 10^{-11} \cdot t^6 - 9 \cdot 10^{-9} \cdot t^5 + 2 \cdot 10^{-6} \cdot t^4 - 1 \cdot 10^{-4} \cdot t^3 + 0,0036 \cdot t^2 - 0,031 \cdot t + 4,757; \\ I_{(25)} = 1 \cdot 10^{-11} \cdot t^6 - 6 \cdot 10^{-9} \cdot t^5 + 1 \cdot 10^{-6} \cdot t^4 - 8 \cdot 10^{-5} \cdot t^3 + 0,0024 \cdot t^2 - 0,0141 \cdot t + 4,517; \\ I_{(35)} = 9 \cdot 10^{-12} \cdot t^6 - 5 \cdot 10^{-9} \cdot t^5 + 8 \cdot 10^{-7} \cdot t^4 - 6 \cdot 10^{-5} \cdot t^3 + 0,0018 \cdot t^2 - 0,0134 \cdot t + 2,143; \\ I_{(37)} = -1 \cdot 10^{-11} \cdot t^6 + 3 \cdot 10^{-9} \cdot t^5 - 2 \cdot 10^{-7} \cdot t^4 + 1 \cdot 10^{-5} \cdot t^3 - 6 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 + 0,0218 \cdot t + 2,072. \end{array} \right. \quad (3.9)$$

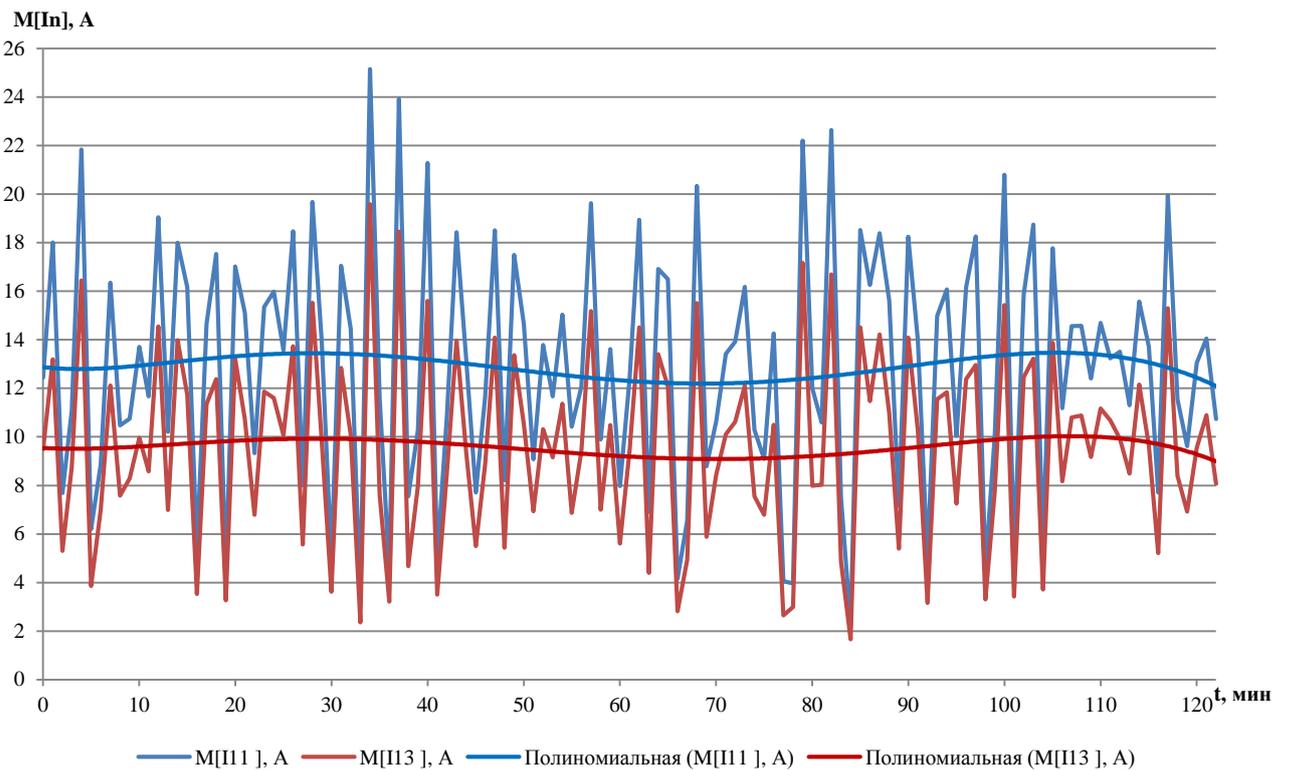
Из уравнений трендов видно, что наибольший вклад в каждый из параметров вносят коэффициенты C_0 – свободные члены детерминированных функций. Эти коэффициенты принимаются за усредненное действующее значение каждого из рассматриваемых параметров графиков нагрузок за рассматриваемый самый загруженный период рабочей смены с 17:40 до 19:42.

Уравнения трендов для остальных рассматриваемых параметров также получены аппроксимацией полиномами 6-го порядка и имеют аналогичную форму записи. Графики нагрузок высоковольтной системы электроснабжения клетевой ПУ аналогичны по своей природе, подчиняются тем же законам и также представлены в виде детерминированных функций в приложении В.

Графики трендов тока основной частоты, тока искажения и токов 11-й и 13-й гармоник представлены на рисунке 3.5.



а)



б)

Рисунок 3.5. Графики детерминированных функций:

а – тока основной частоты и тока искажения; б – токов 11-й и 13-й гармоник

Значения постоянных коэффициентов детерминированных функций графиков нагрузок высоковольтной рудничной сети по рассматриваемым параметрам представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Значения постоянных коэффициентов детерминированных функций

| $I_{(1)}, A$ | I_{II}, A | $I_{(11)}, A$ | $I_{(13)}, A$ | $I_{(23)}, A$ | $I_{(25)}, A$ | $I_{(35)}, A$ | $I_{(37)}, A$ | $P, кВт$ | $S, кВА$ | $tg\varphi$ |
|--------------|-------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------|----------|-------------|
| Скиповая ПУ | | | | | | | | | | |
| 255,5 | 17,66 | 12,93 | 9,57 | 4,76 | 4,52 | 2,14 | 2,07 | 1381 | 2001 | 1,05 |
| Клетевая ПУ | | | | | | | | | | |
| 265,6 | 18,49 | 13,43 | 7,75 | 4,87 | 1,99 | 2,13 | 1,56 | 2246 | 2861 | 0,79 |

Полученные количественные значения трендов токов нагрузки и токов искажения используются при оценке потерь мощности, при расчете параметров ФКУ, обеспечивающих компенсацию ВГ токов и напряжений в высоковольтной рудничной сети.

3.2. Оценка потерь мощности в высоковольтной рудничной сети при несинусоидальных режимах

Высшие гармонические составляющие токов и напряжений в высоковольтных системах электроснабжения общего назначения в целом и рудничных предприятий в частности вызывают ряд негативных явлений [14, 96], основными из которых являются дополнительные потери электрической энергии в элементах систем электроснабжения, таких как, питающие линии, реакторы, силовые и согласующие трансформаторы [19, 20, 98].

Расчет потерь мощности в высоковольтной системе электроснабжения Яковлевского рудника осуществлялся на основании результатов аналитических значений трендов изменения токов ВГ и с учетом усреднения на характерных участках значений токов основной частоты, суммарных коэффициентов гармонических составляющих токов и напряжений, полученных при измерениях. Характерные участки цикла: трогание, разгон, установившееся (равномерное) движение, торможение и дотягивание (рисунок 3.6). При оценке потерь учитывались наиболее выраженные 11, 13, 23, 25, 35 и 37-я гармоники. Значения параметров, полученных на участках усреднения, представлены в таблице 3.5.

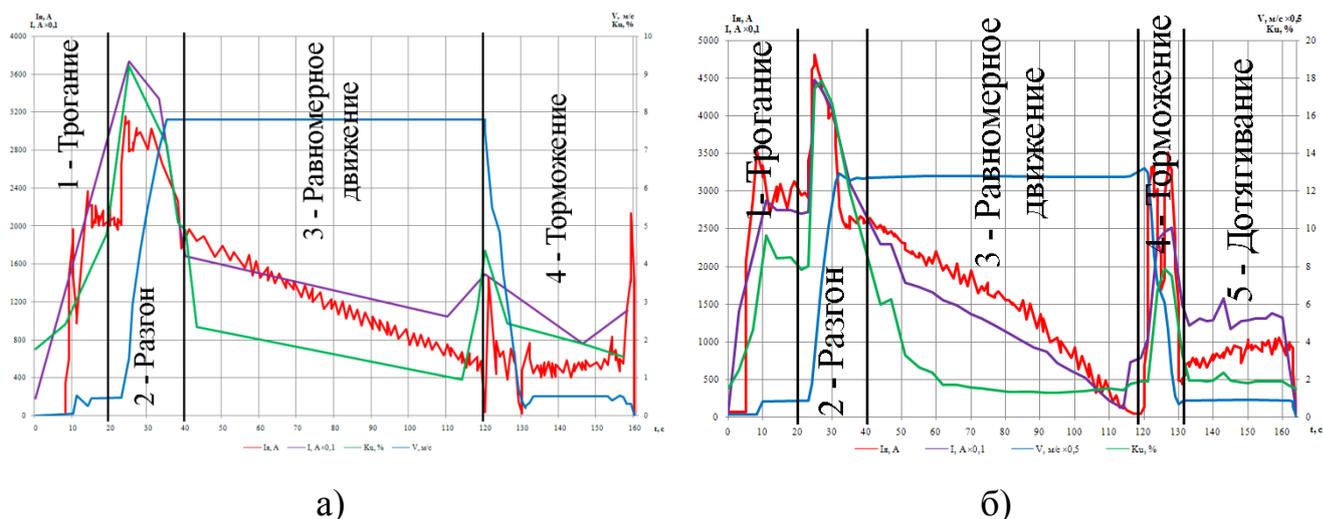


Рисунок 3.6. Характерные участки усреднения цикла работы:

a – скиповой ПУ; *б* – клетевой ПУ

Значения токов соответствующих гармоник определялись по коэффициентам гармонических составляющих [14]:

$$I_n = \frac{K_{I(n)}}{100} \cdot I_1, \quad (3.10)$$

где I_1 – действующее значение тока в высоковольтной рудничной сети на основной частоте, А; n – номер гармоники; $K_{I(n)}$ – коэффициент гармонической составляющей тока n -й гармоники.

Значение тока искажения:

$$I_H = \sqrt{\sum_{i=2}^p I_i^2} = \sqrt{I_{11}^2 + I_{13}^2 + I_{23}^2 + I_{25}^2 + I_{35}^2 + I_{37}^2}, \quad (3.11)$$

где i – номер гармоники; p – число учитываемых гармоник.

Средневзвешенное значение тока основной частоты за цикл:

$$I_{cp} = \frac{I_{(1)1} \cdot t_1 + I_{(1)2} \cdot t_2 + \dots + I_{(1)m} \cdot t_m}{t_1 + t_2 + \dots + t_m}, \quad (3.12)$$

где $I_{(1)1}, I_{(1)2}, \dots, I_{(1)m}$ – значения токов основной частоты на интервалах усреднения; t_1, t_2, \dots, t_m – интервалы времени участков усреднения; m – количество участков усреднения.

Результаты расчета значений токов соответствующих гармоник и токов искажения на участках усреднения, а также средневзвешенных значений представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Параметры участков усреднения

| № участка усреднения | $I_{(l)}$, А | I_H , А | n | 11 | 13 | 23 | 25 | 35 | 37 |
|-----------------------------------|---------------|-----------|----------------|-------|-------|-------|------|------|------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Скиповая ПУ | | | | | | | | | |
| 1 | 215,61 | 8,75 | $K_{I(n)}$, % | 4,28 | 2,68 | 1,28 | 1,19 | 0,53 | 0,67 |
| | | | $K_{U(n)}$, % | 1,59 | 1,04 | 1,20 | 1,11 | 1,11 | 1,48 |
| | | | I_n , А | 6,92 | 4,33 | 2,07 | 1,92 | 0,87 | 1,08 |
| 2 | 310,29 | 18,48 | $K_{I(n)}$, % | 6,07 | 3,92 | 2,09 | 2,09 | 0,91 | 1,13 |
| | | | $K_{U(n)}$, % | 3,32 | 2,45 | 2,69 | 2,65 | 2,41 | 3,29 |
| | | | I_n , А | 14,12 | 9,12 | 4,87 | 4,87 | 2,12 | 2,63 |
| 3 | 275,63 | 14,80 | $K_{I(n)}$, % | 5,53 | 3,51 | 1,91 | 1,77 | 0,81 | 0,97 |
| | | | $K_{U(n)}$, % | 2,72 | 1,87 | 2,13 | 2,07 | 2,00 | 2,60 |
| | | | I_n , А | 11,43 | 7,25 | 3,95 | 3,67 | 1,69 | 2,01 |
| 4 | 133,40 | 6,23 | $K_{I(n)}$, % | 4,76 | 3,20 | 1,84 | 1,25 | 0,84 | 0,43 |
| | | | $K_{U(n)}$, % | 0,88 | 0,60 | 0,69 | 0,53 | 0,65 | 0,72 |
| | | | I_n , А | 4,76 | 3,20 | 1,85 | 1,27 | 0,84 | 0,43 |
| Средне- взвешенные значения | 236,9 | 12,36 | $K_{I(n)}$, % | 5,25 | 3,38 | 1,83 | 1,61 | 0,80 | 0,82 |
| | | | $K_{U(n)}$, % | 4,91 | 3,17 | 1,82 | 1,60 | 0,87 | 0,92 |
| | | | I_n , А | 9,53 | 6,11 | 3,30 | 3,00 | 1,43 | 1,58 |
| Клетевая ПУ | | | | | | | | | |
| 1 | 297,71 | 21,29 | $K_{I(n)}$, % | 8,23 | 3,36 | 3,27 | 1,59 | 1,44 | 0,75 |
| | | | $K_{U(n)}$, % | 4,42 | 5,40 | 2,38 | 1,80 | 0,94 | 0,97 |
| | | | I_n , А | 17,99 | 7,35 | 7,15 | 3,45 | 3,16 | 1,63 |
| 2 | 457,89 | 33,31 | $K_{I(n)}$, % | 8,33 | 2,89 | 3,24 | 1,32 | 1,53 | 1,07 |
| | | | $K_{U(n)}$, % | 8,81 | 11,68 | 4,93 | 3,46 | 1,91 | 1,94 |
| | | | I_n , А | 28,71 | 9,97 | 11,16 | 4,56 | 5,25 | 3,68 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|-----------------------------------|--------|-------|----------------|-------|------|------|------|------|------|
| 3 | 157,19 | 9,59 | $K_{I(n)}, \%$ | 7,15 | 3,73 | 0,97 | 0,76 | 0,23 | 0,25 |
| | | | $K_{U(n)}, \%$ | 2,97 | 4,16 | 1,67 | 1,10 | 0,74 | 0,97 |
| | | | I_n, A | 8,40 | 4,39 | 1,13 | 0,89 | 0,27 | 0,29 |
| 4 | 276,95 | 12,53 | $K_{I(n)}, \%$ | 5,40 | 1,31 | 1,83 | 0,75 | 0,80 | 0,61 |
| | | | $K_{U(n)}, \%$ | 6,09 | 7,59 | 3,51 | 2,61 | 1,41 | 1,26 |
| | | | I_n, A | 11,31 | 2,76 | 3,83 | 1,56 | 1,67 | 1,29 |
| 5 | 130,28 | 6,96 | $K_{I(n)}, \%$ | 5,24 | 4,52 | 1,47 | 0,63 | 0,17 | 0,09 |
| | | | $K_{U(n)}, \%$ | 1,98 | 0,97 | 0,75 | 0,67 | 0,23 | 0,74 |
| | | | I_n, A | 5,15 | 4,43 | 1,43 | 0,60 | 0,17 | 0,09 |
| Средне- взвешенные значения | 239,33 | 15,28 | $K_{I(n)}, \%$ | 6,99 | 3,36 | 1,84 | 0,94 | 0,67 | 0,48 |
| | | | $K_{U(n)}, \%$ | 4,44 | 5,61 | 2,43 | 1,73 | 0,98 | 1,15 |
| | | | I_n, A | 13,11 | 5,57 | 4,06 | 1,91 | 1,68 | 1,16 |

Расчет потерь мощности в линиях электропередач (ЛЭП) [98]:

$$\Delta P_{ЛЭП} = 3 \cdot \sum_{n=2}^p I_n^2 \cdot R_{ЛЭП} \cdot k_m, \quad (3.13)$$

где n – номер гармоники; p – число учитываемых гармоник; I_n – ток n -й гармоники; $R_{ЛЭП}$ – активное сопротивление линии на основной частоте; k_m – коэффициент увеличения сопротивлений в ЛЭП, учитывающий влияние поверхностного эффекта.

Определение коэффициента увеличения сопротивлений в ЛЭП, учитывающего влияние поверхностного эффекта, а также других коэффициентов, учитывающих протекание токов ВГ, описывается в работах [66, 98, 121]:

$$k_m = 1 + \frac{\lambda^4}{3} \quad \text{для } \lambda < 1, \quad (3.14)$$

$$k_m = \lambda + 0,25 + \frac{0,047}{\lambda} \quad \text{для } \lambda > 1, \quad (3.15)$$

где $\lambda = 0,1 \cdot \sqrt{\frac{n}{r_{0(1)}}}$; n – номер гармоники; $r_{0(1)}$ – удельное активное сопротивление ЛЭП, Ом/км.

Результаты расчета коэффициентов увеличения сопротивлений в ЛЭП, учитывающих влияние поверхностного эффекта k_m для основных учитываемых гармоник представлены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Коэффициенты увеличения сопротивления ЛЭП от действия ВГ

| Тип ЛЭП | Марка кабеля/провода | Коэффициент увеличения сопротивления по гармоникам k_m | | | | | |
|---------|----------------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 11 | 13 | 23 | 25 | 35 | 37 |
| КЛ | ААБЛГ-6,3 3×150 | 1,242 | 1,301 | 1,620 | 1,676 | 1,926 | 1,971 |
| ВЛ | АС-185 | 1,160 | 1,223 | 1,492 | 1,541 | 1,765 | 1,806 |

Расчет потерь мощности от токов ВГ в трансформаторах произведен по формуле [98]:

$$\Delta P_T = \Delta P_{xx} \cdot \sum_{n=2}^p \left(\frac{U_n}{U_{ном}} \right)^2 + 0,607 \cdot \frac{\Delta P_{к.з}}{u_{к.з}^2} \cdot \sum_{n=2}^p \frac{1 + 0,05 \cdot n^2}{n\sqrt{n}} \cdot \left(\frac{U_n}{U_{ном}} \right)^2, \quad (3.16)$$

где ΔP_{xx} – потери холостого хода трансформатора; n – номер гармоники; p – число учитываемых гармоник; $\Delta P_{к.з}$ – потери короткого замыкания трансформатора; $u_{к.з}$ – напряжение короткого замыкания трансформатора; U_n – напряжение n -й гармоники; $U_{ном}$ – номинальное напряжение.

Здесь учитываются потери от ВГ холостого хода, потери короткого замыкания, вызванные несинусоидальностью, добавочные потери, обусловленные вихревыми токами в силовом трансформаторе. Результаты расчета потерь в трансформаторах представлены в таблице 3.8.

Потери мощности от токов ВГ в реакторах:

$$\Delta P_P = 3 \cdot \sum_{n=2}^p I_n^2 \cdot R_P \cdot k_m. \quad (3.17)$$

Коэффициент увеличения сопротивлений в реакторах определялся как и для ЛЭП при $\lambda = 0,238 \sqrt{\frac{n}{r_{0(1)}}}$ [66]. Так как активные потери в реакторах крайне малы, расчет коэффициента увеличения сопротивлений в реакторе выполнен упрощенно [8]:

$$k_m = 0,47 \cdot \sqrt{n}. \quad (3.18)$$

Числовые значения параметров элементов высоковольтной системы электроснабжения ПУ Яковлевского рудника приведены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Параметры элементов схемы замещения высоковольтной рудничной сети

| Элемент системы электро-снабжения | R, Ом | X, Ом | 1/к _Т |
|-----------------------------------|--------|--------|------------------|
| Трансформатор ТРДН 25000/110 | 2,532 | 55,545 | 0,05478 |
| Трансформатор ТДТП-8000/10 | 0,056 | 0,387 | 0,167 |
| Трансформатор ТСЗП-4000/10 | 0,031 | 0,367 | 0,131 |
| ВЛ АС-185 | 6,46 | 16,77 | - |
| КЛ ААБлГ-6,3 3×150 | 0,0927 | 0,0333 | - |
| Реактор РБСДГ 10-2×1600 | 0,003 | 0,250 | - |

Дополнительные потери мощности при несинусоидальных режимах за цикл работы каждой ПУ определялись как сумма потерь в кабельных и воздушных линиях, реакторах и трансформаторах на каждом интервале усреднения:

$$\Delta P_{\text{дон}} = \sum_{j=1}^P (\Delta P_{\text{ЛЭП}j} + \Delta P_{Pj} + \Delta P_{Tj}). \quad (3.19)$$

Результаты оценки дополнительных потерь мощности в высоковольтной системе электроснабжения каждой ПУ за цикл работы представлены в таблице 3.8. Дополнительные потери мощности приведены в сравнении с общими потерями за один цикл на тех же участках усреднения.

Таблица 3.8 – Результаты оценки дополнительных потерь мощности
в высоковольтной рудничной сети за цикл работы ПУ

| № гармоники | 11 | 13 | 23 | 25 | 35 | 37 | Σ |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|
| Скиповая ПУ | | | | | | | |
| $(\Delta P_{ЛЭПj} + \Delta P_{Pj})_{\text{дон}}$, кВт | 0,0388 | 0,0167 | 0,0061 | 0,0052 | 0,0014 | 0,0017 | 0,0699 |
| $(\Delta P_{ЛЭП} + \Delta P_P)_{\text{общ}}$, кВт | | | | | | | 6,30 |
| $(\Delta P_{Tj})_{\text{дон}}$, кВт | 4,46 | 1,94 | 0,79 | 0,63 | 0,22 | 0,25 | 8,27 |
| $(\Delta P_T)_{\text{общ}}$, кВт | | | | | | | 44,03 |
| $\Delta P_{\text{донj}}$, кВт | 4,494 | 1,954 | 0,795 | 0,633 | 0,216 | 0,249 | 8,34 |
| $\Delta P_{\text{общ}}$, кВт | | | | | | | 50,33 |
| Клетевая ПУ | | | | | | | |
| $(\Delta P_{ЛЭП} + \Delta P_P)_{\text{дон}}$, кВт | 0,0735 | 0,0139 | 0,0092 | 0,0021 | 0,0019 | 0,0009 | 0,1015 |
| $(\Delta P_{ЛЭП} + \Delta P_P)_{\text{общ}}$, кВт | | | | | | | 6,43 |
| $(\Delta P_{Tj})_{\text{дон}}$, кВт | 5,99 | 10,00 | 2,32 | 1,22 | 0,45 | 0,64 | 20,62 |
| $(\Delta P_T)_{\text{общ}}$, кВт | | | | | | | 43,21 |
| $\Delta P_{\text{донj}}$, кВт | 6,068 | 10,013 | 2,325 | 1,219 | 0,456 | 0,638 | 20,72 |
| $\Delta P_{\text{общ}}$, кВт | | | | | | | 49,64 |

Гистограммы дополнительных и общих потерь мощности в элементах высоковольтных систем электроснабжения ПУ за один цикл работы представлены на рисунке 3.7.

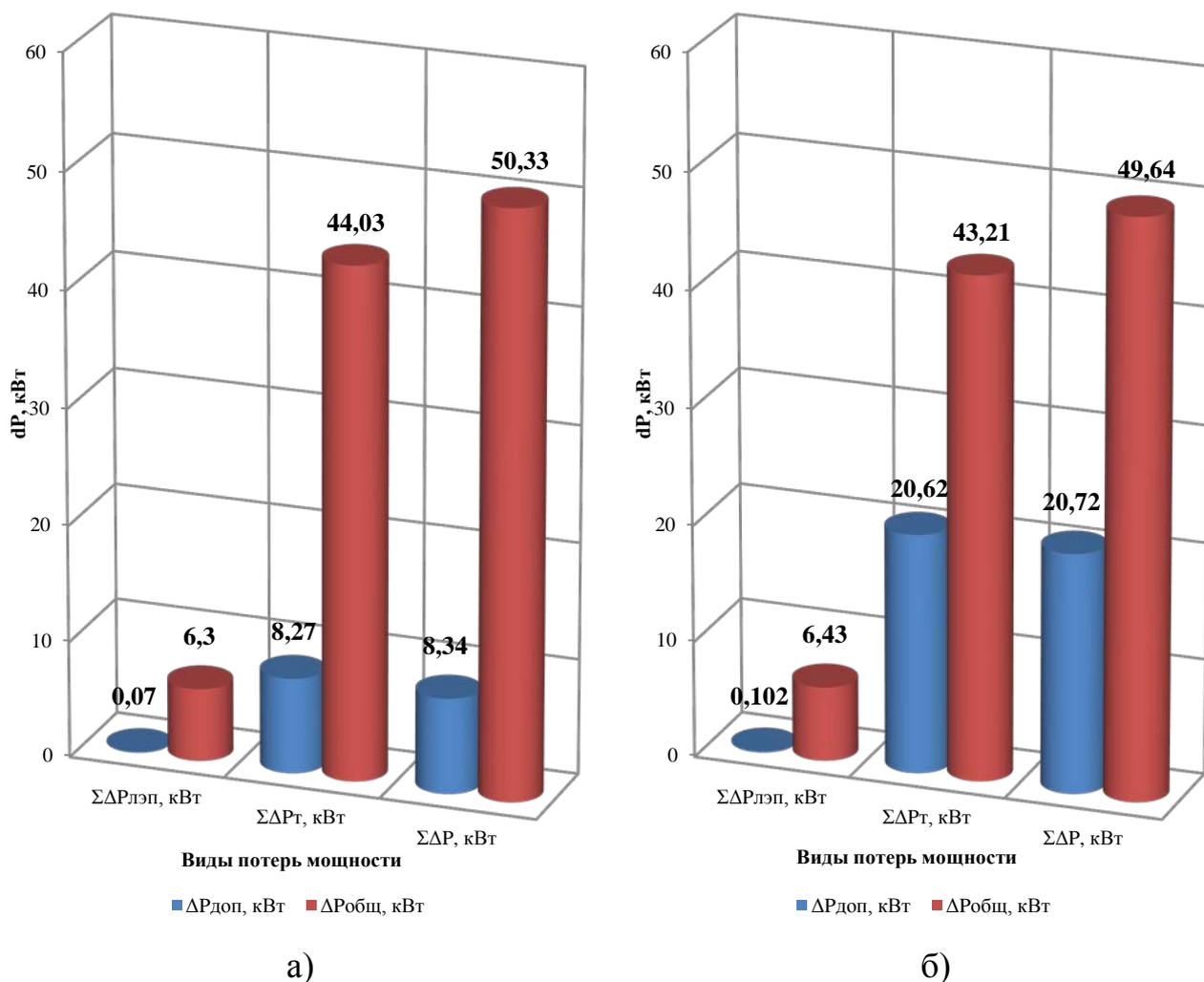


Рисунок 3.7. Гистограммы дополнительных и общих потерь мощности в высоковольтных системах электроснабжения за цикл работы:

a – скиповой ПУ; *б* – клетевой ПУ

Оценка дополнительных потерь мощности в высоковольтной рудничной сети при несинусоидальных режимах с учетом полученных значений трендов представлены в таблице 3.9. Расчет потерь выполнен по предложенной выше методике отдельно для высоковольтной системы электроснабжения скиповой и клетевой ПУ. Дополнительные потери мощности с учетом полученных значений трендов приведены в сравнении с общими потерями при соответствующих токах.

Таблица 3.9 – Результаты оценки дополнительных потерь мощности
в высоковольтной рудничной сети с учетом значений трендов

| № гармоники | 11 | 13 | 23 | 25 | 35 | 37 | Σ |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|
| Скиповая ПУ | | | | | | | |
| $(\Delta P_{ЛЭПj} + \Delta P_{Pj})_{\text{дон}}$, кВт | 0,0715 | 0,0411 | 0,0126 | 0,0118 | 0,0030 | 0,0029 | 0,143 |
| $(\Delta P_{ЛЭП} + \Delta P_P)_{\text{общ}}$, кВт | | | | | | | 7,32 |
| $(\Delta P_{Tj})_{\text{дон}}$, кВт | 1,58 | 1,04 | 1,32 | 1,38 | 1,32 | 2,38 | 9,01 |
| $(\Delta P_T)_{\text{общ}}$, кВт | | | | | | | 45,77 |
| $\Delta P_{\text{донj}}$, кВт | 1,656 | 1,077 | 1,331 | 1,390 | 1,322 | 2,381 | 9,156 |
| $\Delta P_{\text{общ}}$, кВт | | | | | | | 53,09 |
| Клетевая ПУ | | | | | | | |
| $(\Delta P_{ЛЭП} + \Delta P_P)_{\text{дон}}$, кВт | 0,0771 | 0,0270 | 0,0132 | 0,0023 | 0,0030 | 0,0017 | 0,124 |
| $(\Delta P_{ЛЭП} + \Delta P_P)_{\text{общ}}$, кВт | | | | | | | 7,91 |
| $(\Delta P_{Tj})_{\text{дон}}$, кВт | 6,01 | 13,34 | 2,31 | 1,03 | 0,53 | 0,66 | 23,88 |
| $(\Delta P_T)_{\text{общ}}$, кВт | | | | | | | 46,28 |
| $\Delta P_{\text{донj}}$, кВт | 6,083 | 13,368 | 2,324 | 1,028 | 0,533 | 0,665 | 24,002 |
| $\Delta P_{\text{общ}}$, кВт | | | | | | | 54,20 |

Гистограммы дополнительных и общих потерь мощности в элементах высоковольтных систем электроснабжения скиповой и клетевой ПУ с учетом полученных значений трендов представлены на рисунке 3.8.

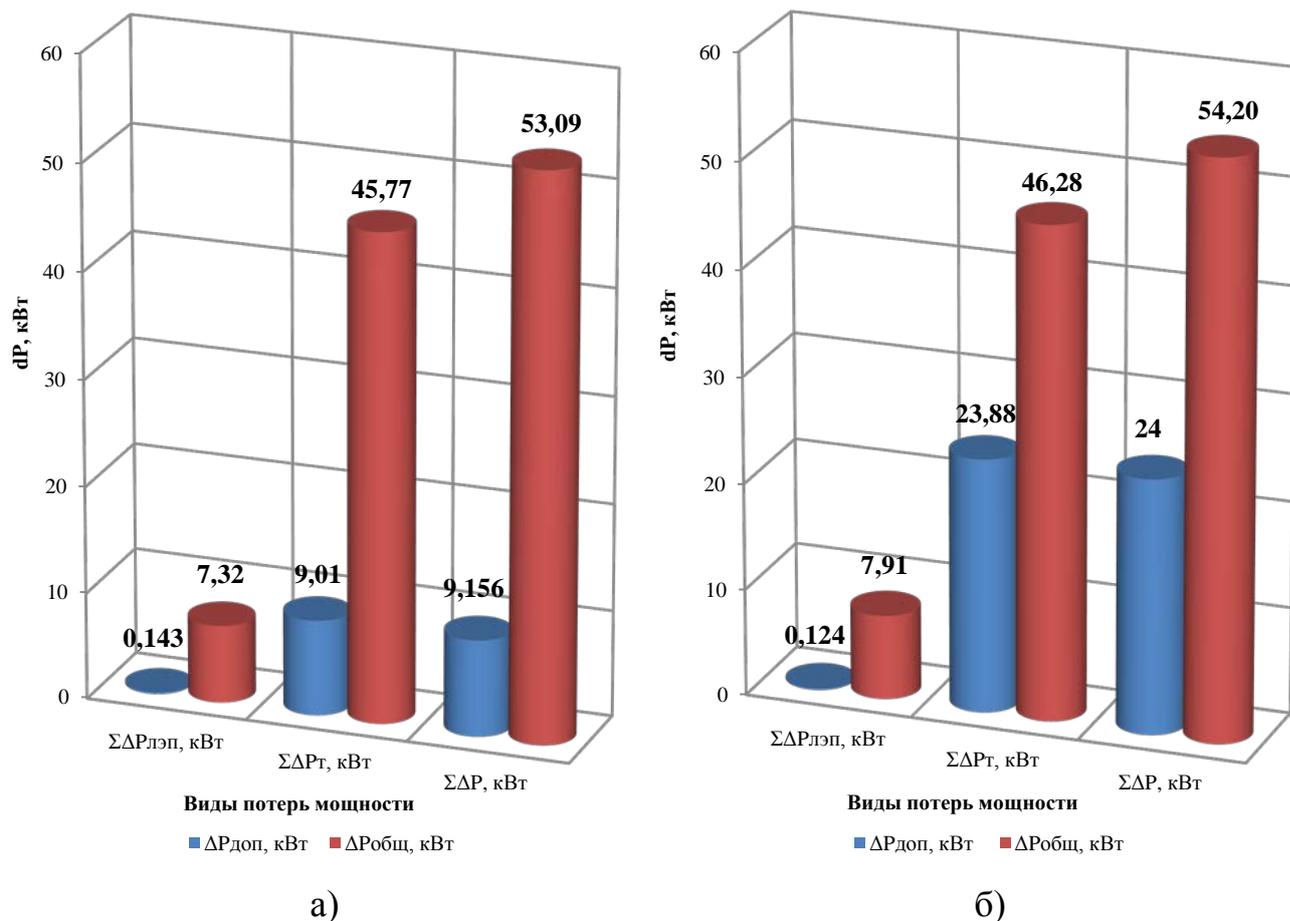


Рисунок 3.8. Гистограммы дополнительных потерь мощности в высоковольтных системах электроснабжения с учетом трендов:

а – скиповой ПУ; б – клетевой ПУ

Дополнительные потери мощности в элементах систем электроснабжения при несинусоидальных режимах за один цикл работы соответственно составили:

- для скиповой ПУ $\Delta P_{доп} = 8,34$ кВт;
- для клетевой ПУ $\Delta P_{доп} = 20,72$ кВт.

Дополнительные потери мощности в элементах систем электроснабжения при несинусоидальных режимах с учетом определенных трендов параметров высоковольтной рудничной сети соответственно составили:

- для скиповой ПУ $\Delta P_{доп} = 9,16$ кВт;
- для клетевой ПУ $\Delta P_{доп} = 24,0$ кВт.

При этом дополнительные потери мощности в кабельных линиях, в воздушных линиях и в реакторах имеют незначительную величину. Наибольшие потери мощности наблюдаются в трансформаторах. Суммарные дополнительные потери

активной мощности в высоковольтной рудничной сети при несинусоидальных режимах соответственно составили:

- за один цикл работы $\Delta P_{\Sigma \text{don}} = 29,06$ кВт.
- с учетом трендов параметров $\Delta P_{\Sigma \text{don}} = 33,16$ кВт.

Как видно из таблиц 3.8, 3.9 и рисунков 3.7, 3.8 дополнительные потери мощности при несинусоидальных режимах в сравнении с общими потерями соответственно составили:

- за один цикл работы:
 - для скиповой ПУ $\delta_{\text{don}} = 16,57$ %;
 - для клетевой ПУ $\delta_{\text{don}} = 41,74$ %;
- с учетом трендов параметров:
 - для скиповой ПУ $\delta_{\text{don}} = 16,99$ %;
 - для клетевой ПУ $\delta_{\text{don}} = 44,3$ %.

Полученные значения дополнительных потерь активной мощности имеют значительную величину и примерно составляют от 16,5 до 44 % от основных потерь мощности. Это доказывает необходимость выбора ФКУ для снижения дополнительных потерь мощности в высоковольтной рудничной сети.

3.3. Обоснование и расчет параметров фильтров для компенсации высших гармоник токов и напряжений в высоковольтной рудничной сети

В настоящее время широкое применение получили статические регулируемые и нерегулируемые фильтрокомпенсирующие устройства, основными элементами которых являются емкостные и индуктивные элементы. Это связано с многофункциональностью подобных технических средств, надежностью, относительно низкой стоимостью и возможностью размещения практически в любом узле электрической сети. В некоторых технико-экономически обоснованных случаях могут быть использованы активные и гибридные фильтры различной конфигурации. Для компенсации реактивной мощности и повышения коэффициента мощности, фильтрации высших гармоник тока, снижения колебаний напряжения и улучшения параметров качества электроэнергии в электрических сетях 6–10 кВ целесообразно применять следующие ТС: неуправляемые, ступенчато-

регулируемые компенсирующие устройства, статические тиристорные компенсирующие устройства, пассивные, а в ряде случаев активные фильтры гармоник и накопители энергии. Выбор типа устройств всегда должен осуществляться по тому признаку или параметру, который в данном узле представляется приоритетным [30–32, 122].

Для компенсации высших гармоник используют различного рода фильтры. Из большого разнообразия фильтров наиболее широко используются пассивные фильтры (ПФ), которые представляют собой пассивную частотно-селективную цепь, обеспечивающую ослабление высших гармоник, генерируемых нелинейной нагрузкой.

В электроэнергетике применяются четыре типа ПФ: первого, второго, третьего порядков и фильтры С-типа [8, 35]. ПФ снижают значения напряжений ВГ в узлах сети, изменяя её частотные свойства. ПФ состоят из реактора (катушки индуктивности), одного или нескольких конденсаторов, резистора с активным сопротивлением, соединенных между собой [35].

ПФ гармоник классифицируют по следующим признакам:

1. Порядок фильтра. Определяется порядком цепи, т. е. суммарным числом конденсаторов и реакторов. В простейшем случае используют фильтры первого порядка.

2. Характер включения (параллельно нагрузке, последовательно с нагрузкой, комбинированная схема). Через параллельный фильтр замыкается только небольшая часть тока, тогда как последовательный фильтр должен быть рассчитан на полный ток нагрузки. Поэтому преимущественное распространение получили параллельные ПФГ.

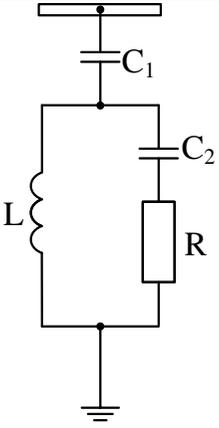
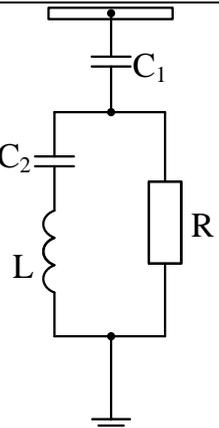
3. Число фаз (однофазные, трехфазные трехпроводные, трехфазные четырехпроводные).

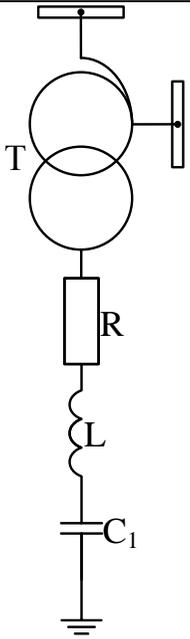
4. Частотный диапазон. Различают узкополосные резонансные пассивные фильтры, настроенные на частоту одной из гармоник, и широкополосные, способные ослабить несколько гармоник в заданном диапазоне частот [14].

Сравнительный анализ пассивных фильтров гармоник, их основные характеристики, область применения и назначение, достоинства и недостатки представлены в таблице 3.10.

Таблица 3.10 – Сравнительный анализ пассивных фильтров гармоник

| Тип фильтра | Краткая характеристика | Принципиальные схемы | Колич. реактивных элементов | Добротность | Достоинства | Недостатки |
|----------------------------------|---|----------------------|--|---|---|--|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| ПФГ первого порядка | Параллельный колебательный контур с индуктивностью внешней сети | | Емкостной элемент – 1 | - | Простота | Имеет высокие потери на основной частоте из-за применения конденсатора большой мощности, что ограничивает его использование |
| Резонансный или узкополосный ПФГ | Настраивается на частоту определенной гармоники | | Емкостной элемент – 1 Индуктивный элемент – 1 | 30–50 30–60 | Эффективно ослабляет гармонические составляющие, частоты которых близки к резонансной частоте. Простота, экономичность и надёжность. Получил широкое распространение в сетях с нелинейными нагрузками | Эффективность снижается при изменении гармонического состава токов и напряжений и параметров сети. Возможность возникновения резонанса в параллельном колебательном контуре, образуемом фильтром и индуктивностью питающей сети, на частотах, близких к частотам высших гармоник |
| ПФГ второго порядка | Одновременное подавление нескольких гармоник | | Емкостной элемент – 1 Индуктивный элемент – 1 | 0,5–5 Более высокие значения – в тех случаях, когда необходимо ослабить близко расположенные гармоники. Добротность выбирается такой, чтобы обеспечить получение заданной характеристики в определённом диапазоне частот | Удобен в эксплуатации, в сопоставлении с фильтром первого порядка имеет более низкие потери на основной частоте. Обеспечивает снижение значений гармонических составляющих напряжения в электрических сетях в более широком диапазоне частот. Широко используется в промышленности | Потери на частоте основной гармоники велики по сравнению с узкополосным фильтром |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-----------------------------|--|--|--|---|---|--|
| <p>ПФГ третьего порядка</p> | <p>Одновременное подавление нескольких гармоник. Представляет собой устройство, состоящее из двух конденсаторов C_1, C_2, реактора L и активного сопротивления R. Для упрощения расчетов емкости конденсаторов принимают одинаковыми</p> |  | <p>Емкостной элемент – 2 Индуктивный элемент – 1</p> | <p>0,5–5 Более высокие значения – в тех случаях, когда необходимо ослабить близко расположенные гармоники. Добротность выбирается такой, чтобы обеспечить получение заданной характеристики в определенном диапазоне частот</p> | <p>Малые (меньшие) потери на основной частоте в сравнении с фильтром второго порядка, обеспечивает снижение значений гармонических составляющих напряжения в электрических сетях в более широком диапазоне частот</p> | <p>Уменьшение возможности получения требуемой частотной характеристики в полосе ослабления. Из-за высокой стоимости и сложности редко используется в промышленности</p> |
| <p>ПФГ С-типа</p> | <p>Включение в поперечную ветвь фильтра второго порядка конденсатор C_2. Емкость конденсатора C_2 должна быть такой, чтобы резонансная частота контура LC_2 совпала с частотой основной гармоники</p> |  | <p>Емкостной элемент – 2 Индуктивный элемент – 1</p> | <p>3–5 Добротность выбирается такой, чтобы обеспечить получение заданной характеристики в определенном диапазоне частот. Частотную характеристику фильтра можно варьировать, изменяя сопротивление демпфирующего резистора R</p> | <p>Меньшие потери мощности на частоте основной гармоники по сравнению с узкополосными фильтрами, второго и третьего порядков. Обеспечение снижения значений гармонических составляющих напряжения в электрических сетях в более широком диапазоне частот. Обеспечивают компенсацию реактивной мощности на частоте основной гармоники и ослабление высших гармоник. В первую очередь происходит подавление гармоники, частота которой совпадает с резонансной частотой фильтра</p> | <p>Точная настройка на частоту основной гармоники, большой разброс номиналов конденсаторов и соответственно большая суммарная емкость. Высокая чувствительность к изменениям основной частоты и отклонениям параметров элементов. Степень ослабления гармоник, частоты которых превосходят резонансную, невелика</p> |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---|---|---|------------------------------|------------------------|---|---|
| <p>ПФГ специальной настройки (ПФСН)</p> | <p>Батарея статических конденсаторов подключается к обмотке низшего напряжения трансформатора, в результате чего образуется последовательный резонансный контур, состоящий из активного сопротивления обмотки низшего напряжения трансформатора, индуктивного сопротивления рассеяния обмотки низшего напряжения трансформатора и ёмкостного сопротивления конденсаторной батареи</p> |  | <p>Ёмкостной элемент – 1</p> | <p>30-50 30-60</p> | <p>Такой вариант подключения фильтра позволяет уменьшить его номинальное напряжение, тем самым снизить стоимость и фильтра, и коммутационного оборудования. Эффективно ослабляет гармонические составляющие, частоты которых близки к резонансной частоте. Простота, экономичность и надёжность.</p> <p>Суть метода построения ПФСН заключается в настройке фильтра на определённую частоту или определённую полосу частот, гармонический состав которых необходимо свести до допустимых уровней, применением только ёмкостного сопротивления с использованием имеющихся активного и индуктивного сопротивлений сети (трансформатора)</p> | <p>Эффективность снижается при изменении гармонического состава токов и напряжений и параметров сети. Возможность возникновения резонанса в параллельном колебательном контуре, образуемом фильтром и индуктивностью питающей сети, на частотах, близких к частотам высших гармоник.</p> <p>Возможное изменение настроек при изменении параметров трансформатора, при авариях в нём</p> |

Важным показателем для фильтра является его добротность Q , характеристическая частота f_x , демпфирующий коэффициент m и резонансная частота ω_1 :

$$Q = \frac{X_n}{R}; \quad f_x = 1/2\pi CR; \quad m = L/R^2C; \quad \omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}, \quad (3.20)$$

где X_n – индуктивное или ёмкостное сопротивление при резонансе; L , C , R – соответственно, индуктивность, емкость и активное сопротивление пассивного фильтра [8, 75, 83].

Добротность фильтра характеризует полосу его пропускания. Фильтр с высоким уровнем добротности (от 30 до 60) настраивается строго на одну частоту. Фильтр же с низким уровнем добротности (не более 5) имеет пониженное сопротивление в достаточно широком диапазоне частот [8, 14]. Добротность широкополосных фильтров выбирается такой, чтобы обеспечить получение заданной характеристики в определённом диапазоне частот.

Кроме рассмотренных вариантов ПФ, подавление нескольких гармоник могут обеспечивать структуры, образованные параллельным соединением нескольких секций. Каждая секция представляет собой колебательный контур, настроенный на частоту одной из гармоник. Установка таких фильтров вблизи нелинейной нагрузки также обеспечивает замыкание на землю токов высших гармоник через соответствующий колебательный контур. Составной фильтр содержит резонансную ветвь, обеспечивающую подавление гармоники низшего порядка. Это исключит возможность усиления этой гармоники за счет параллельного резонанса.

Практически все рассмотренные виды пассивных фильтров находят применение для компенсации ВГ в системах электроснабжения, но выбор конкретного типа фильтров и места их установки определяются параметрами нелинейной нагрузки и системой электроснабжения.

Для выбора наиболее подходящего варианта фильтров рассмотрены несколько различных способов синтеза ПФ.

Первым рассмотрен фильтр одной частоты. Для компенсации одной конкретной гармоники может использоваться фильтр одной частоты – резонансный фильтр. В состав такого фильтра входят элемент активного сопротивления, и не-

которые емкость с индуктивностью, создающие резонанс на частоте заданной гармонической составляющей. Полное входное сопротивление данного фильтра определяется формулой

$$Z_1 = R + j \left(\omega_1 \cdot L - \frac{1}{\omega_1 \cdot C} \right). \quad (3.21)$$

Для конкретных нелинейных электроприёмников (электропривод по системе ТП-Д) резонансный фильтр может быть использован для компенсации 11-й и 13-й гармоник [8]. Определение параметров данных фильтров производится на основании канонических схем реактивных двухполюсников. С этой целью электрическая сеть приводится к эквивалентной схеме типа «фильтр гармоник – внешняя сеть» (рисунок 3.9) [14].

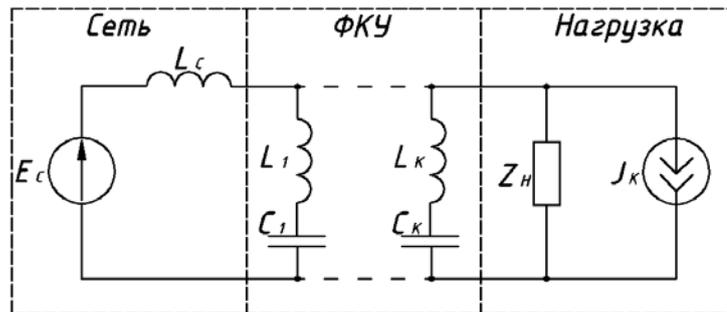


Рисунок 3.9. Эквивалентная схема «фильтр гармоник – внешняя сеть»

Из рисунка 3.9 видно, что нагрузка выступает в качестве источника гармонических составляющих напряжения E_K и тока J_K . Сеть и фильтр здесь образуют Г-образный четырехполюсник. Параметры данного четырехполюсника определяются формулой [14, 15]

$$\begin{bmatrix} I_C \\ U_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{21} & F_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_K \\ J_K \end{bmatrix}, \quad (3.22)$$

где F_{11} – входная проводимость системы «фильтр – внешняя сеть» со стороны источника гармоник, $F_{11} = I_C/E_K$; F_{12} – коэффициент передачи тока k -й гармоники в сеть, $F_{12} = I_C/J_K$; F_{21} – коэффициент передачи напряжения k -й гармоники в сеть, $F_{21} = U_C/E_K$; F_{22} – сопротивление в точке общего присоединения, $F_{22} = U_C/J_K$.

Матрица гибридных параметров схемы через сопротивление системы и фильтра записывается следующим образом [14]:

$$[F] = \begin{bmatrix} 1 & -Z_{\text{ПФ}} \\ \frac{1}{Z_{\text{ПФ}} + Z_C} & \frac{Z_{\text{ПФ}} + Z_C}{Z_{\text{ПФ}} \cdot Z_C} \\ \frac{Z_{\text{ПФ}}}{Z_{\text{ПФ}} + Z_C} & \frac{Z_{\text{ПФ}} + Z_C}{Z_{\text{ПФ}} + Z_C} \end{bmatrix}. \quad (3.23)$$

Параметры резонансных ПФ с учетом их частотных характеристик определяются по каноническим схемам Фостера (рисунок 3.10). Входное сопротивление $Z(s)$ определяется по формуле [123]

$$Z(s) = \frac{H \cdot (s - s_1) \cdot (s - s_3) \cdot \dots \cdot (s - s_{2n-1})}{(s - s_2) \cdot (s - s_4) \cdot \dots \cdot (s - s_{2n})}, \quad (3.24)$$

где s – комплексное значение некоторой частоты, $s = \sigma + j\omega$.

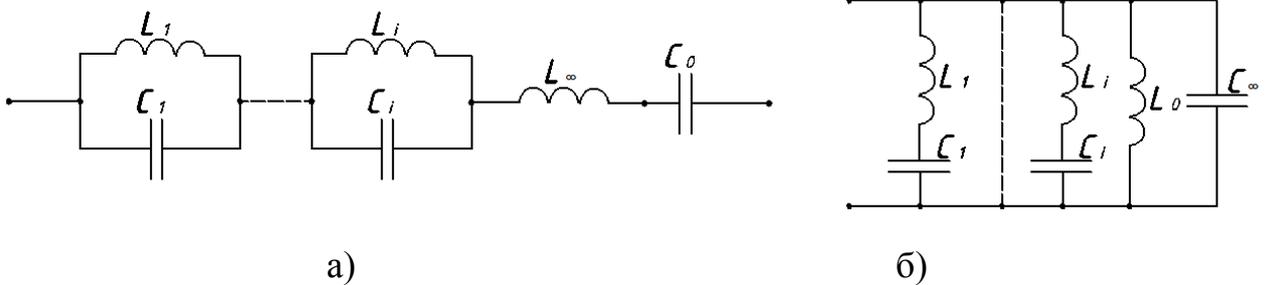


Рисунок 3.10. Первая (а) и вторая (б) канонические схемы Фостера

В уравнении (3.24) к четным частотам относят собственные частоты двухполюсника в режиме холостого хода (полюсы функции), а к нечетным – собственные частоты двухполюсника в режиме короткого замыкания (нули функции). Уравнение (3.24) может быть представлено в следующих двух вариациях:

$$Z(s) = H \cdot \frac{\prod_{i=1}^n (s^2 + \omega_{zi}^2)}{\prod_{j=1}^n (s^2 + \omega_{pj}^2)} = H \cdot \frac{N(s)}{D(s)}, \quad (3.25)$$

$$Y(s) = \frac{1}{Z(s)} = \frac{1}{H} \cdot \frac{\prod_{j=1}^n (s^2 + \omega_{pj}^2)}{\prod_{i=1}^n (s^2 + \omega_{zi}^2)} = \frac{1}{H} \cdot \frac{D(s)}{N(s)}, \quad (3.26)$$

где H – коэффициент нормирования.

Коэффициент нормирования H определяется следующей формулой [14]:

$$H = \frac{U_{\Phi}^2}{Q \cdot Z_{\text{ВХ}} \cdot (1j)}, \quad (3.27)$$

где U_ϕ – фазное напряжение в месте установки фильтра; Q – требуемая реактивная мощность резонансного ПФ (на одну фазу).

При разложении функции ((3.25) первая схема Фостера) на сумму простых дробей, получено следующее выражение для $Z(s)$ [124]:

$$Z(s) = \frac{k_0}{s} + k_\infty \cdot s + \sum_{j=1}^n \frac{k_j \cdot s}{s^2 + \omega_{pj}^2}, \quad (3.28)$$

где k_∞ – вычет, соответствующий полюсу в бесконечности; k_0 – вычет, соответствующий полюсу в начале координат.

Для определения вычетов в полюсах рассматриваемых частот применяется формула

$$k_j = \frac{(s^2 + \omega_{pj}^2) \cdot Z(s)}{s}, \quad (3.29)$$

где $s^2 = -\omega_{pj}^2$.

После определения вычетов, находят значения индуктивных и емкостных элементов цепи по формулам:

$$C_j = \frac{1}{k_j}, \quad L_j = \frac{k_j}{\omega_{pj}^2}. \quad (3.30)$$

Для второй схемы Фостера аналогичным образом раскладывают на простые дроби функцию (3.32). Следовательно, все необходимые уравнения выглядят следующим образом:

$$Y(s) = \frac{k_0}{s} + k_\infty \cdot s + \sum_{i=1}^n \frac{k_i \cdot s}{s^2 + \omega_{zi}^2}; \quad (3.31)$$

$$k_i = \frac{(s^2 + \omega_{zi}^2) \cdot Y(s)}{s}; \quad (3.32)$$

$$L_i = \frac{1}{k_i}, \quad C_i = \frac{k_i}{\omega_{zi}^2}, \quad (3.33)$$

где $s^2 = -\omega_{zi}^2$.

Вторая схема Фостера является более предпочтительной по следующим причинам [14]:

- суммарная емкость первой схемы значительно выше емкости второй,

вследствие чего является более дорогой;

– при изменении одного из элементов цепи первой схемы происходит изменение всех нулей сопротивления фильтра, что усложняет настройку фильтра на частоты подавляемых гармоник.

Расчет параметров резонансных ПФ начинают с определения коэффициента нормирования H . С этой целью задается определённая величина мощности компенсации Q_K , которая рассчитывается с учетом экономически целесообразного коэффициента реактивной мощности:

$$Q_K = \alpha \cdot P \cdot (\operatorname{tg}\varphi - \operatorname{tg}\varphi_3), \quad (3.34)$$

где α – коэффициент, учитывающий повышение $\cos\varphi$ естественным способом, $\alpha = 0,9$; $\operatorname{tg}\varphi$ и $\operatorname{tg}\varphi_3$ – значение коэффициентов реактивной мощности до и после компенсации; P – активная мощность нагрузки в месте установки компенсирующих устройств.

Значение требуемого коэффициента реактивной мощности для сетей 1-20 кВ принято равным 0,4 [125]. В таблице 3.11 представлены расчетные значения параметров резонансных ПФ для систем электроснабжения скиповой и клетевой ПУ.

Таблица 3.11 – Расчетные значения резонансных ПФ

| Тип подъемной установки | P , кВт | Q_K , квар | H | Номер гармоники | k_i | L_i , мГн | C_i , мкФ | Q_i , квар | Q | R , Ом |
|-------------------------|-----------|--------------|-------|-----------------|-------|-------------|-------------|--------------|-----|----------|
| Скиповая ПУ | 1381 | 807,89 | 0,274 | 11 | 1,752 | 1,817 | 46,09 | 193,1 | 60 | 0,1047 |
| | | | | 13 | 1,904 | 1,672 | 35,87 | 150,0 | | 0,1138 |
| Клетевая ПУ | 2246 | 788,35 | 0,312 | 11 | 1,537 | 2,071 | 40,43 | 169,5 | | 0,1193 |
| | | | | 13 | 1,674 | 1,905 | 31,47 | 131,6 | | 0,1297 |

Для компенсации токов 11-й и 13-й высших гармоник также можно использовать фильтр двойной настройки. Данный фильтр, в отличие от двух однополосных фильтров снижает потери мощности на основной частоте. Для проведения

синтеза данного фильтра используются схемы двух однополосных фильтров и одного фильтра двойной настройки (рисунок 3.11) [8].

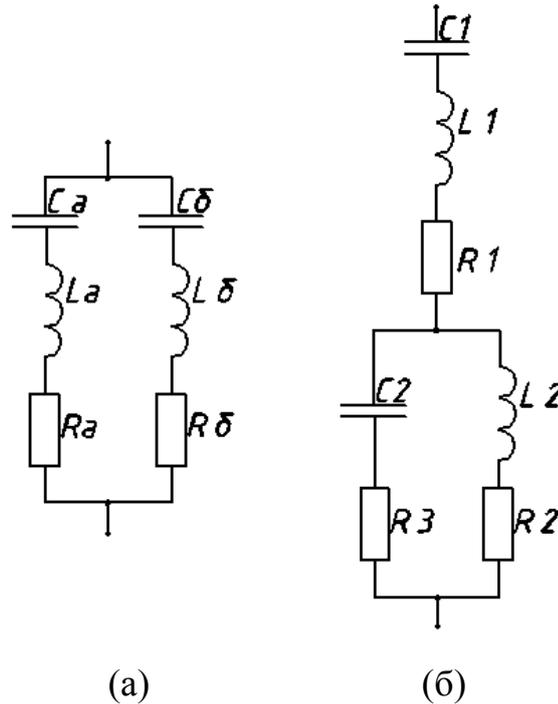


Рисунок 3.11. Схема двух однополосных фильтров (а) и эквивалентная ей схема фильтра двойной настройки (б)

Расчет параметров фильтра двойной настройки определяется по формулам:

$$C_1 = C_a + C_б, \quad (3.35)$$

$$C_2 = \frac{C_a \cdot C_б \cdot (C_a + C_б) \cdot (L_a + L_б)^2}{(L_a \cdot C_a - L_б \cdot C_б)^2}, \quad (3.36)$$

$$L_1 = \frac{L_a \cdot L_б}{L_a + L_б}, \quad (3.37)$$

$$L_2 = \frac{(L_a \cdot C_a - L_б \cdot C_б)^2}{(C_a + C_б)^2 \cdot (L_a + L_б)}, \quad (3.38)$$

$$R_2 = R_3 = R_a \left[\frac{a^2(1-x^2)}{(1+ax^2)^2(1+x^2)} \right] + R_б \left[\frac{1-x^2}{(1+ax^2)^2(1+x^2)} \right] + R_1 \left[\frac{(1-x^2)(1-ax^2)}{(1+ax^2)(1+x^2)} \right], \quad (3.39)$$

где $a = \frac{C_a}{C_б}$ и $x = \sqrt{\frac{L_б \cdot C_б}{L_a \cdot C_a}}$.

Добавочное сопротивление R_1 определяется минимальным значением активного сопротивления катушки индуктивностью L_1 и при расчетах принимается

равным нулю $R_1 = 0$. Расчетные параметры фильтров двойной настройки представлены в таблице 3.12.

Таблица 3.12 – Расчетные значения фильтров двойной настройки

| Тип подъемной установки | C_1 , мкФ | L_1 , мГн | C_2 , мФ | L_2 , мГн | $R_2 (R_3)$, Ом |
|-------------------------|-------------|-------------|------------|-------------|------------------|
| Скиповая ПУ | 81,95 | 0,871 | 2,91 | 0,0241 | 0,018 |
| Клетевая ПУ | 71,9 | 0,992 | 2,56 | 0,0275 | 0,021 |

Также для компенсации 11-й и 13-й гармоник может использоваться фильтр С-типа. Данный фильтр способствует уменьшению потерь мощности на основной частоте. Конфигурация данного фильтра представлена на рисунке в таблице 3.10. Данный фильтр является альтернативой полосового фильтра, т.е. способен выбирать из сети конкретный номер гармоники.

Расчет данного фильтра выполняется по следующей методике [14]:

$$C_1 = \frac{Q_1}{\omega_1 \cdot U_\phi^2}, \quad C_2 = C_1 \cdot (n^2 - 1), \quad L = \frac{1}{\omega_1^2 \cdot C_2}, \quad R \approx 2\pi \cdot L \cdot n \cdot Q, \quad (3.40)$$

где Q_1 – реактивная мощность компенсации фильтра на фазу; n – номер ослабляемой гармонической составляющей.

Полученные по формулам (3.40) параметры фильтров С-типа для систем электроснабжения подъемных установок представлены в таблице 3.13.

Таблица 3.13 – Расчетные значения параметров фильтров С-типа

| Тип подъемной установки | Номер гармоники | Q_1 , квар | C_1 , мкФ | C_2 , мФ | L , мГн | Q | R , Ом |
|-------------------------|-----------------|--------------|-------------|------------|-----------|-----|----------|
| Скиповая ПУ | 11 | 193,1 | 46,47 | 5,576 | 1,817 | 60 | 376,74 |
| | 13 | 150,0 | 36,08 | 6,061 | 1,672 | | 409,62 |
| Клетевая ПУ | 11 | 169,5 | 40,77 | 4,892 | 2,071 | | 429,41 |
| | 13 | 131,6 | 31,65 | 5,318 | 1,905 | | 466,89 |

Для компенсации гармонических составляющих токов высших порядков

используются широкополосные фильтры. Наиболее распространенными широкополосными фильтрами являются фильтры второго и третьего порядков, схемы которых представлены на рисунках в таблице 3.10.

Расчет параметров широкополосных фильтров выполняется по следующей методике [8]:

$$C_1 = \frac{Q_k}{\omega_1 \cdot U^2}; \quad \omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot n; \quad R = \frac{1}{C_1 \cdot \omega_0}; \quad L = m \cdot R^2 \cdot C, \quad (3.41)$$

где n – номер настраиваемой гармоники; ω_0 – резонансная частота; m – демпфирующий коэффициент, принимается $m = 1$.

Параметры фильтра третьего порядка соответствуют параметрам фильтра второго порядка. Исключением является конденсатор C_2 , емкость которого соответствует емкости C_1 . Параметры фильтров второго и третьего порядков представлены в таблице 3.14.

Таблица 3.14 – Расчетные значения параметров широкополосных фильтров второго и третьего порядков

| Тип подъемной установки | $C (C_1, C_2)$, мкФ | L , мГн | Q | R , Ом | Q_k , квар |
|-------------------------|----------------------|-----------|-----|----------|--------------|
| Скиповая ПУ | 71,43 | 0,268 | 1 | 1,937 | 807,89 |
| Клетевая ПУ | 69,71 | 0,275 | 1 | 1,985 | 788,35 |

Широкополосные фильтры были настроены на 23-ю гармоническую составляющую [8]. Как видно из конструкции фильтров и результатов расчета их параметров, фильтр третьего порядка имеет два конденсатора и большую емкость. Следовательно, при прочих равных условиях более целесообразно использовать широкополосный фильтр второго порядка.

Таким образом, для компенсации ВГ токов и напряжений предлагаются к установке резонансные ПФ на 11-ю и 13-ю гармоники и широкополосный фильтр на гармоники начиная с 23-й. Также возможно применение ПФ двойной настройки, фильтров С-типа в комбинации с широкополосными фильтрами второго и третьего порядков.

3.4. Оценка частотных характеристик высоковольтной рудничной сети

Влияние на передачу ВГ токов и напряжений от источника в сеть оказывает частотная характеристика сети. Для установления характера зависимости генерации ВГ в сеть проведено исследование частотных характеристик рудничной высоковольтной сети на основании схемы замещения (рисунок 3.12).

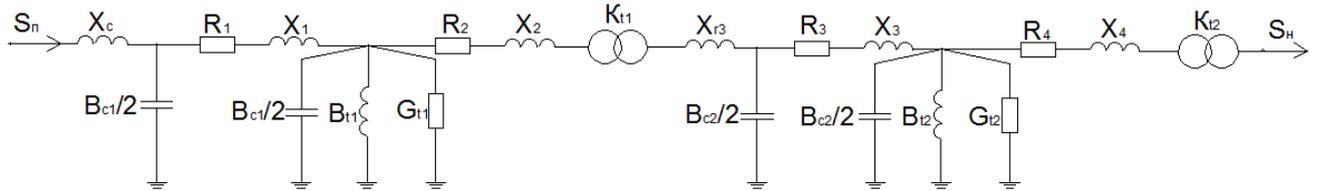


Рисунок 3.12. Схема замещения рудничной сети

На основании схемы замещения (рисунок 3.12) получена формула определения полного сопротивления рудничной высоковольтной сети в функции от частоты. Частотные характеристики сети совместно с ПФ позволяют оценить эффективность компенсации токов ВГ на определенных частотах.

$$Z_c(j\omega) = \frac{1}{\left(\left(\left(\left(\frac{j\omega C_{c1}}{2 \cdot K_{T1}^2} + \frac{K_{T1}^2}{j\omega L_c} \right)^{-1} + j\omega L_1 \cdot K_{T1}^2 \right)^{-1} + \frac{j\omega C_{c1}}{2 \cdot K_{T1}^2} + \frac{K_{T1}^2}{j\omega L_{T1}} \right)^{-1} + j\omega L_2 \cdot K_{T1}^2 + j\omega L_{r3} \right)^{-1} + \frac{j\omega C_{c2}}{2} + j\omega L_3} \cdot \frac{2}{j\omega C_{c2}} \quad (3.42)$$

Уравнение полного сопротивления составлено до точки места установки фильтрокомпенсирующих устройств (шины 6 кВ согласующего трансформатора). Поскольку активное сопротивление сети не изменяется, его значение не учитывается. Частотная характеристика сети существенно расширяет представление о режимах её работы при различном составе и вариациях нагрузки на высших гармониках, предупреждает о возможных резонансах тока и напряжения, позволяет определить мероприятия по компенсации высших гармоник [30–32].

На рисунке 3.13 представлена частотная характеристика сети в области частот до 1500 рад/с и выше 1500 рад/с.

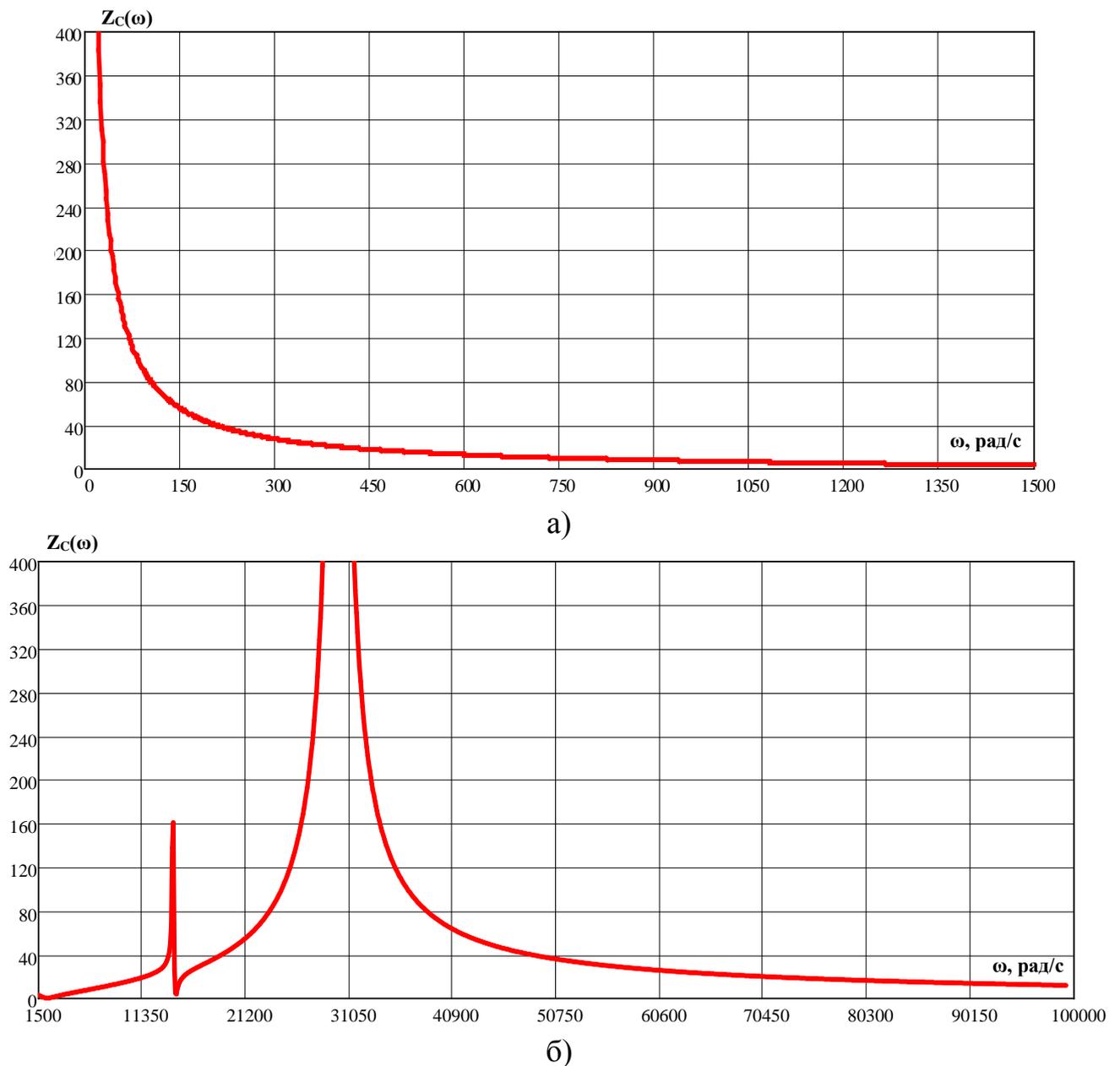


Рисунок 3.13. Графики зависимости сопротивления сети от частоты

Как следует из рисунка 3.13, начиная с частоты 150 рад/с сопротивление сети незначительно, это говорит о том, что сеть не является препятствием для распространения ВГ. Резонансные явления в сети возможны лишь на сверхвысоких частотах свыше 10 000 рад/с.

С помощью матрицы (3.23) с учетом расчетных параметров рассматриваемых ПФ построены частотные характеристики «фильтр – внешняя сеть» для каждой из питающих сетей ПУ. На рисунке 3.14 в качестве примера представлена частотная характеристика системы электроснабжения скиповой ПУ «резонансные ПФ на 11-ю и 13-ю гармоники (вторая схема Фостера) – внешняя сеть».

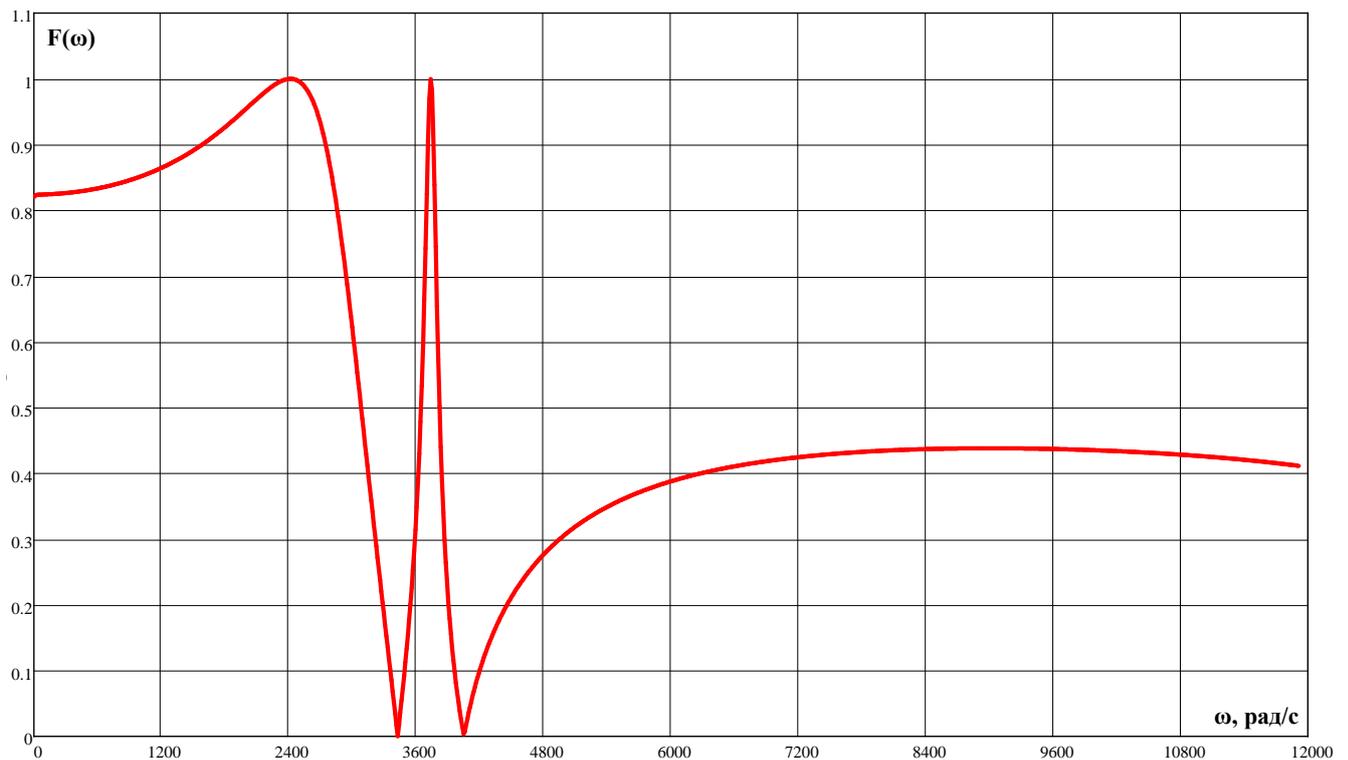


Рисунок 3.14. Частотная характеристика сети скиповой ПУ «резонансные ПФ – внешняя сеть»

Из графика видно, что частоты 11-й (3455,75 рад/с) и 13-й (4084,07 рад/с) гармонических составляющих находятся в нулях функции, что свидетельствует об эффективной компенсации этих гармоник резонансными ПФ. Для клетевой ПУ частотная характеристика имеет аналогичный вид (приложение Г), так как нули и полюсы для функций были указаны одинаковые.

На рисунке 3.15 представлена частотная характеристика системы электропитания скиповой ПУ «ПФ двойной настройки – внешняя сеть». Из частотной характеристики следует, что нули функции находятся на 11-й и 13-й частотах гармоник, полюс расположен на частоте 12-й гармоники. Можно отметить сходство частотной характеристики данного фильтра гармоник с частотной характеристикой ПФ, синтезированного по схеме Фостера.

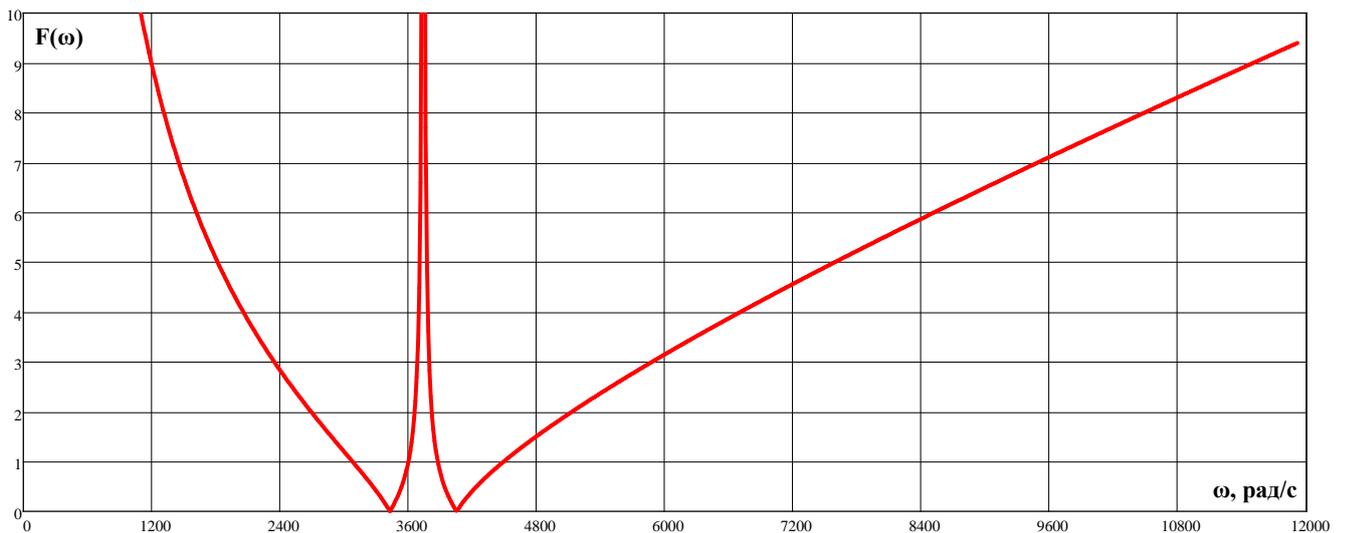


Рисунок 3.15. Частотная характеристика сети скиповой ПУ «ПФ двойной настройки – внешняя сеть»

Частотные характеристики фильтра по схеме Фостера и сдвоенного фильтра практически идентичны. Однако сопротивление системы «ПФ двойной настройки – внешняя сеть» на частотах до 11-й и после 13-й намного выше, чем для системы «резонансные ПФ – внешняя сеть», что может способствовать усилению как канонических гармоник, так и неканонических и интергармоник на этих частотах. Кроме этого, ПФ двойной настройки имеет более сложную конфигурацию, что приводит к его более точной настройке. При выходе из строя любого элемента сдвоенного фильтра его настройки сбиваются. При аналогичной неисправности фильтра, разработанного по схеме Фостера, он частично будет выполнять свою работу. Ещё одним недостатком сдвоенного фильтра является его более высокая стоимость, поскольку в рассмотренной модели необходимо использовать конденсаторы значительной емкости. Поэтому при выборе между двумя этими видами ПФ предпочтение стоит отдать фильтру, разработанному по схеме Фостера, ввиду его технических особенностей.

Частотная характеристика системы электроснабжения скиповой ПУ «ПФ С-типа – внешняя сеть» приведена на рисунке 3.16.

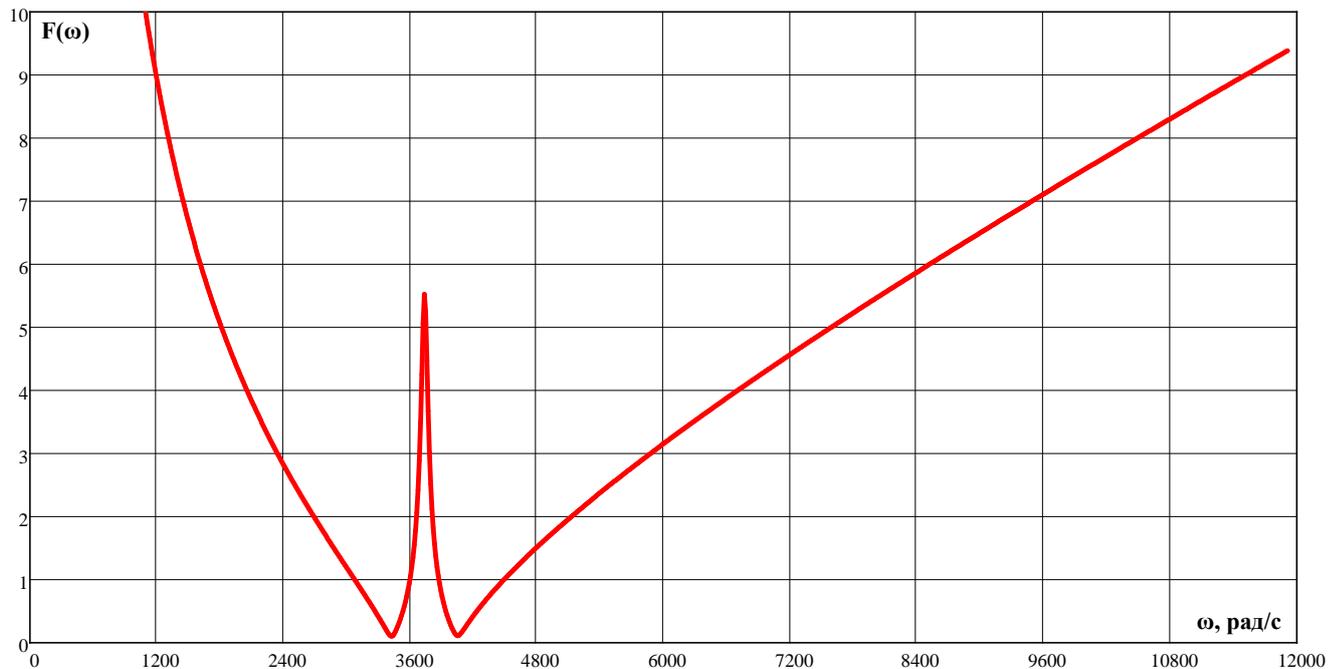


Рисунок 3.16. Частотная характеристика системы электроснабжения скиповой ПУ «ПФ С-типа – внешняя сеть»

Как видно из рисунка 3.16 нули частотной характеристики системы «ПФ С-типа – внешняя сеть» также расположены на частотах 11-й и 13-й гармоник. Частотная характеристика фильтра С-типа также имеет схожий вид с частотной характеристикой резонансного ПФ, разработанного по схеме Фостера. Однако ввиду значительной емкости двух конденсаторов схема С-типа (вместо одного по схеме Фостера) имеет значительную стоимость при идентичных результатах частотного моделирования. Кроме этого, сопротивление такой системы в области низких частот (0–3400 рад/с) и в области высоких частот (от 4200 рад/с и более) имеет значительную величину, что может привести к увеличению ВГ напряжений на этих частотах. На основании сравнения трех видов ПФ, предназначенных для компенсации 11-й и 13-й ВГ токов и напряжений можно сделать вывод, что схема ПФ, разработанная по второй схеме Фостера, является наиболее приемлемой и может использоваться для компенсации указанных ВГ.

Также были составлены и рассмотрены частотные характеристики широкополосных фильтров (рисунок 3.17).

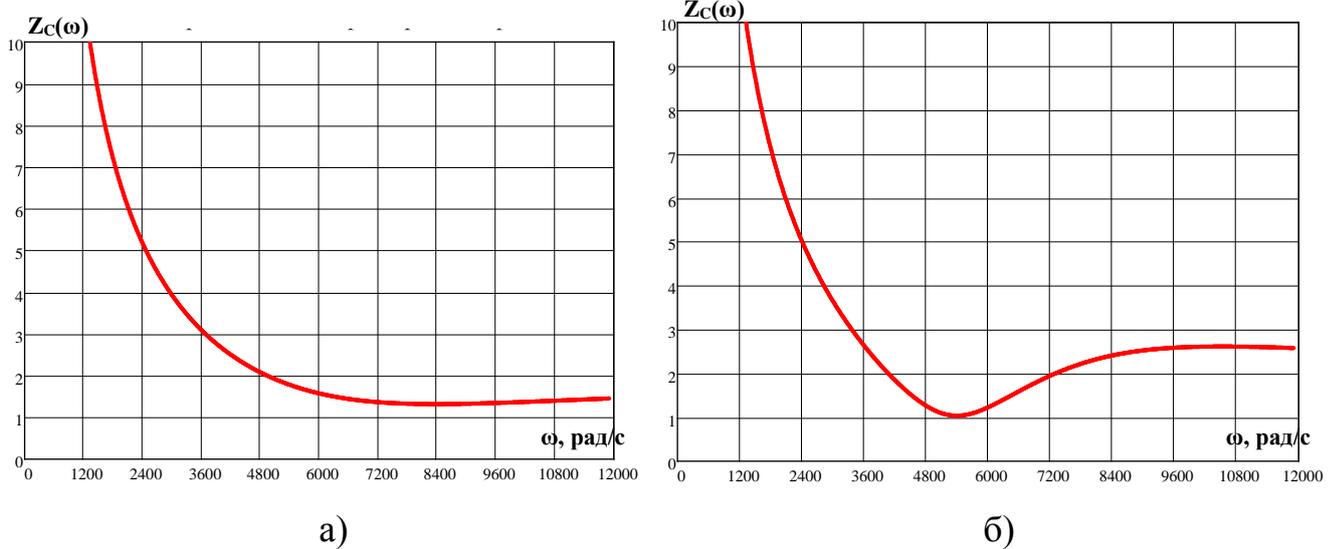


Рисунок 3.17. Графики зависимости сопротивления широкополосного фильтра второго порядка (а) и широкополосного фильтра третьего порядка (б) от частоты

Широкополосные фильтры [8, 14] были настроены на 23-ю гармоническую составляющую, наиболее выраженную гармонику в области высоких частот после 13-й гармоники. Как видно из графиков, фильтр второго порядка на данной частоте обладает более низким сопротивлением вплоть до гармонических составляющих 40-го порядка. Широкополосный фильтр второго порядка является одним из наиболее распространенных, поскольку не требует сложной настройки и довольно четко выполняет свои функции. Схема фильтра третьего порядка обладает более низкими потерями мощности на основной частоте, однако такая конфигурация фильтра может повлечь за собой изменение требуемой частотной характеристики в полосе ослабления. Поэтому широкополосный фильтр второго порядка является более предпочтительным для компенсации ВГ в области высоких частот, начиная с 23-й.

Таким образом, на основе анализа параметров и частотных характеристик различных видов ПФ для компенсации ВГ токов и напряжений в высоковольтной рудничной сети предлагается использовать резонансные ПФ, синтезированные по второй схеме Фостера, для компенсации 11-й и 13-й гармоник и широкополосный фильтр второго порядка для компенсации ВГ, начиная с 23-й. На рисунке 3.18 представлена частотная характеристика системы электроснабжения скиповой ПУ «комбинированный ПФ – внешняя сеть».

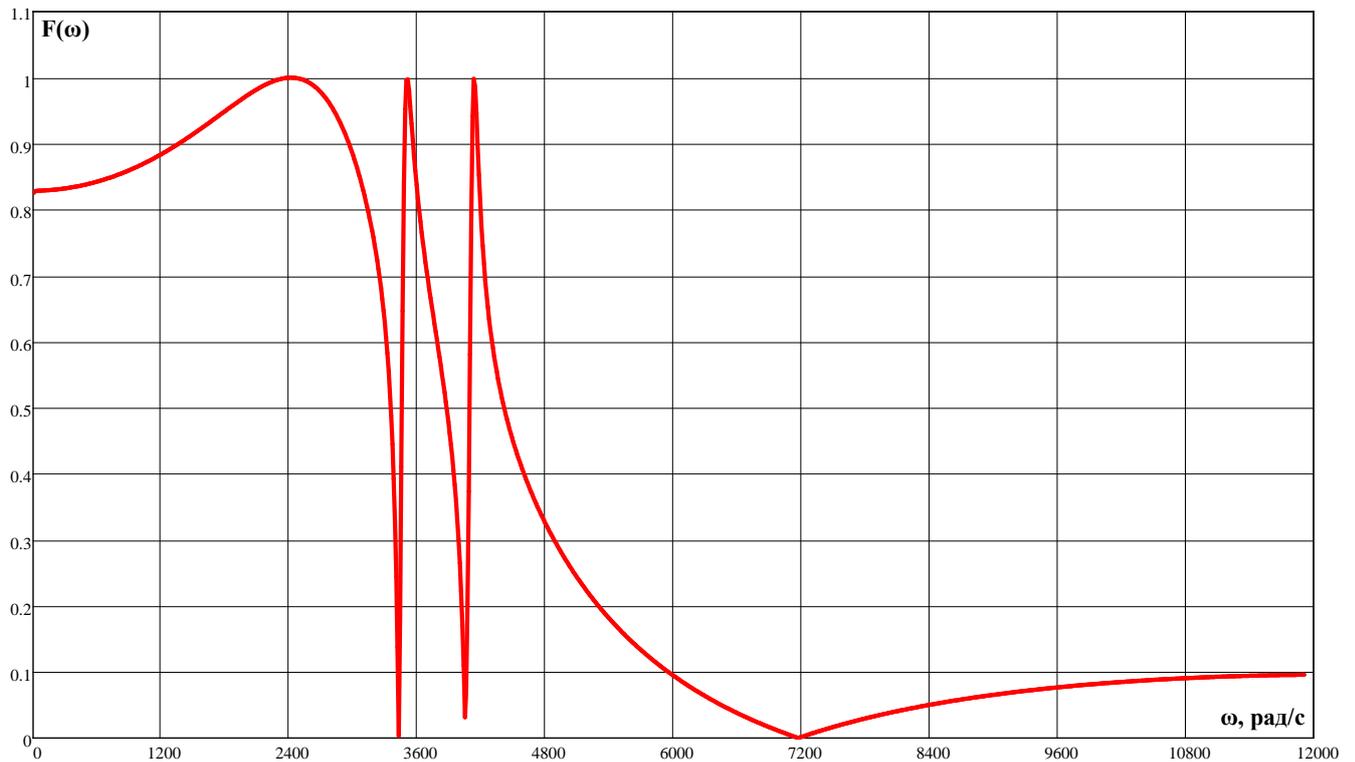


Рисунок 3.18. Частотная характеристика системы электроснабжения скиповой ПУ «комбинированный ПФ – внешняя сеть»

Как видно из рисунка 3.18 частотная характеристика системы имеет нули на частотах 11-й (3455,75 рад/с), 13-й (4084,07 рад/с) и 23-й (7225,66 рад/с) гармоник. В области высоких частот выше 23-й гармоники (более 7225,66 рад/с) и до 40 (12566,37 рад/с) включительно характеристика имеет низкий уровень сопротивления. На основе анализа частотной характеристики системы можно сделать вывод, что комбинированный фильтр предназначен для глубокой компенсации 11-ой и 13-ой гармоник и для значительного снижения уровня гармоник на высоких частотах, начиная с 23-й.

Выводы

1. Выполнена идентификация параметров и определение вероятностных характеристик токов нагрузок и искажений. Результаты идентификации показывают, что изменения токов нагрузок и искажений относятся к случайным стационарным процессам. Количественные характеристики случайных процессов позволили выявить наиболее вероятный диапазон изменения значений токов нагрузок и

искажений. На основе проведенной идентификации выполнена оценка дополнительных потерь мощности в элементах высоковольтных систем электроснабжения при несинусоидальных режимах.

2. Дополнительные потери мощности в элементах высоковольтной рудничной систем электроснабжения при несинусоидальных режимах с учетом идентификации токов искажения, соответственно, составили для скиповой ПУ $\Delta P_{\text{дон}} = 9,16$ кВт, для клетевой ПУ $\Delta P_{\text{дон}} = 24,0$ кВт, что в сумме составляет $\Delta P_{\Sigma\text{дон}} = 33,16$ кВт. При этом дополнительные потери активной мощности в сравнении с общими потерями, соответственно, составили для скиповой ПУ $\delta_{\text{дон}} = 16,99$ %, для клетевой ПУ $\delta_{\text{дон}} = 44,3$ %. Наличие дополнительных потерь активной мощности за счет несинусоидальности токов и напряжений увеличивают технологические суммарные потери на величину от 16,5 до 44 %.

3. Выполнен расчет параметров ПФ и анализ частотных характеристик эквивалентных систем типа «фильтр – внешняя сеть» для четырех вариантов ПФ, применяемых для компенсации ВГ токов и напряжений в сетях, питающих мощные 12-пульсные тиристорные преобразователи. Окончательный выбор сочетания ПФ основывается на решении задачи оптимизации.

4. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМПЕНСАЦИИ ВЫСШИХ ГАРМОНИК И СНИЖЕНИЯ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ РУДНИЧНОЙ СЕТИ

В четвертой главе выполнено обоснование типов ФКУ на основании решения многокритериальной задачи оптимизации с использованием аппарата нечетких множеств. Произведено имитационное моделирование с учетом установки выбранных ФКУ и приведено технико-экономическое обоснование использования ФКУ для компенсации ВГ токов и напряжений и снижения потерь мощности в высоковольтных рудничных сетях.

4.1. Выбор фильтрокомпенсирующих устройств на основании решения многокритериальной задачи оптимизации с использованием аппарата нечетких множеств

Выбор конкретного типа ФКУ требует решения многокритериальной задачи оптимизации, что означает выбор лучшего варианта одновременно по нескольким критериям. Последнее время широко используются нечеткие множества при оптимизации режимов электроэнергетических систем [126–128]. С математической точки зрения решение многокритериальной задачи оптимизации позволяет выбрать оптимальный вариант при критериях равной и различной важности [129–132].

Применение резонансных ПФ, настроенных на 11-ю и 13-ю гармоники, в достаточной степени снижают их уровень, так, например, в данном случае их уровень не превышает 0,06–0,07 % по току и 0,07–0,11 % по напряжению. Однако гармонические составляющие 23, 25, 35 и 37-го порядков усилились за счет изменения частотных характеристик систем электроснабжения скиповой и клетевой ПУ. Уровень суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения в этом случае незначительно снижается, а в некоторых случаях уровень суммарных коэффициентов гармонических составляющих тока возрастает. Это обусловлено введением резонансных ПФ в состав высоковольтных сетей и увеличе-

нием их сопротивления на высоких частотах, выше 13-й. Таким образом, это свидетельствует о неэффективности отдельного использования резонансных ПФ, что доказывает необходимость использования резонансных фильтров в сочетании с широкополосными фильтрами.

При установке широкополосных ПФ второго порядка для компенсации ВГ, начиная с 23-й, без резонансных фильтров, эффективность компенсации высокочастотных гармоник высока, но при этом уровень 11-й и 13-й гармоник может возрасти с увеличением нагрузки или при изменении режима работы ПУ в связи с возросшим сопротивлением сети в области низких частот. Таким образом, для компенсации ВГ токов и напряжений в рудничной высоковольтной сети могут применяться четыре равнозначных варианта ПФ в качестве ФКУ:

- резонансные ПФ, настроенные на 11-ю и 13-ю гармоники, и ШПФ второго порядка, настроенный на компенсацию ВГ, начиная с 23-й (рисунок в таблице 3.10 и параметры настройки в таблицах 3.11 и 3.14) – Φ_1 ;
- ПФ двойной настройки на 11-ю и 13-ю гармоники и ШПФ второго порядка, настроенный на компенсацию ВГ, начиная с 23-й (рисунок в таблице 3.10 и параметры настройки в таблицах 3.12 и 3.14) – Φ_2 ;
- ПФ С-типа, настроенный на 11-ю и 13-ю гармоники, и ШПФ второго порядка, настроенный на компенсацию ВГ, начиная с 23-й (рисунок в таблице 3.10 и параметры настройки в таблицах 3.13 и 3.14) – Φ_3 ;
- резонансные ПФ, настроенные на 11, 13, 23, 25, 35 и 37-ю гармоники (рисунок в таблице 3.10 и параметры настройки в таблице 3.11) – Φ_4 .

Существующие методы компенсации ВГ токов и напряжений, выбора величины и места размещения ФКУ в системах электроснабжения основаны на минимизации потерь активной мощности и приведенных затрат [107, 133, 134]. В предложенных решениях присутствует ряд недостатков: неучет свойств частотных характеристик «фильтр – внешняя сеть»; потерь мощности в ФКУ. В расчетах применяются детерминированные значения параметров систем электроснабжения и эмпирические формулы по учету изменения сопротивления сети в зависимости от номеров ВГ. Применение методов, базирующихся на нечетких множе-

ствах, позволяет принимать решения за счет формализации человеческих способностей рассуждать.

С математической точки зрения при одинаковой важности критериев задачу выбора оптимального варианта можно представить в следующем виде [132].

Пусть имеется множество из k альтернатив $A = \{a_1, a_2, \dots, a_k\}$. Тогда для критерия (требования) T может быть рассмотрено нечеткое множество:

$$T = \{\mu_T(a_1)/a_1, \mu_T(a_2)/a_2, \dots, \mu_T(a_k)/a_k\}, \quad (4.1)$$

где $\mu_T(a_i) [0, 1]$ – оценка альтернативы a_i по критерию (требованию) T , которая характеризует степень соответствия альтернативы понятию, определяемому критерием (требованием) T .

Если имеется n критериев (требований): T_1, T_2, \dots, T_n , то лучшей считается альтернатива, удовлетворяющая и критерию (требованию) T_1 , и T_2 , и ..., и T_n . Тогда правило для выбора наилучшей альтернативы может быть записано в виде пересечения соответствующих нечетких множеств:

$$D = T_1 \cap T_2 \cap \dots \cap T_n. \quad (4.2)$$

Операции пересечения нечетких множеств соответствует операция минимизации, выполняемая над их функциями принадлежности. В качестве лучшей выбирается альтернатива a^* , имеющая наибольшее значение функции принадлежности [132].

В нашем случае требуется выбрать ФКУ таким образом, чтобы они отвечали следующим требованиям: T_1 – капитальные затраты с учетом установки и монтажа ФКУ и эксплуатационных издержек; T_2 – свойства частотных характеристик «фильтр – внешняя сеть» с точки зрения компенсации канонических гармоник и усиления интергармоник и субгармоник; T_3 – потери мощности в элементах ФКУ; T_4 – способность компенсации реактивной мощности на основной гармонике.

Оценки альтернатив по представленным критериям (требованиям) получены на основании статистической обработки графиков нагрузок по токам основной частоты и токам ВГ (рисунок 3.5, таблица 3.4), а также на основании экспертных оценок (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Экспертные оценки для принятых альтернатив
по представленным критериям

| Альтернатива | Оценки альтернатив (экспертные оценки) | | | |
|-----------------------------|--|---------|---------|---------|
| | μ_1 | μ_2 | μ_3 | μ_4 |
| Критерий (требование) T_1 | | | | |
| Φ_1 | 0,6 | 0,8 | 0,9 | 0,95 |
| Φ_2 | 0,5 | 0,6 | 0,65 | 0,7 |
| Φ_3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,8 |
| Φ_4 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 |
| I_u, A | 0–5 | 5–10 | 10–20 | 20–50 |
| Критерий (требование) T_2 | | | | |
| Φ_1 | 1 | 0,9 | 0,85 | 0,7 |
| Φ_2 | 0,8 | 0,75 | 0,7 | 0,65 |
| Φ_3 | 0,85 | 0,8 | 0,75 | 0,7 |
| Φ_4 | 0,9 | 0,8 | 0,7 | 0,6 |
| I_u, A | 0–5 | 5–10 | 10–20 | 20–50 |
| Критерий (требование) T_3 | | | | |
| Φ_1 | 0,9 | 0,85 | 0,8 | 0,7 |
| Φ_2 | 0,9 | 0,8 | 0,75 | 0,6 |
| Φ_3 | 0,75 | 0,8 | 0,85 | 0,9 |
| Φ_4 | 0,8 | 0,75 | 0,7 | 0,6 |
| I_u, A | 0–5 | 5–10 | 10–20 | 20–50 |
| Критерий (требование) T_4 | | | | |
| Φ_1 | 0,85 | 0,8 | 0,7 | 0,6 |
| Φ_2 | 0,7 | 0,75 | 0,8 | 0,85 |
| Φ_3 | 0,8 | 0,85 | 0,9 | 1 |
| Φ_4 | 0,85 | 0,7 | 0,6 | 0,5 |
| I_u, A | 0–5 | 5–10 | 10–20 | 20–50 |

На основании таблицы 4.1 представлена оценка альтернатив при одинаковой важности критериев (требований) на рисунке 4.1, из которого наглядно видна степень влияния каждого критерия на выбор оптимального варианта ФКУ.

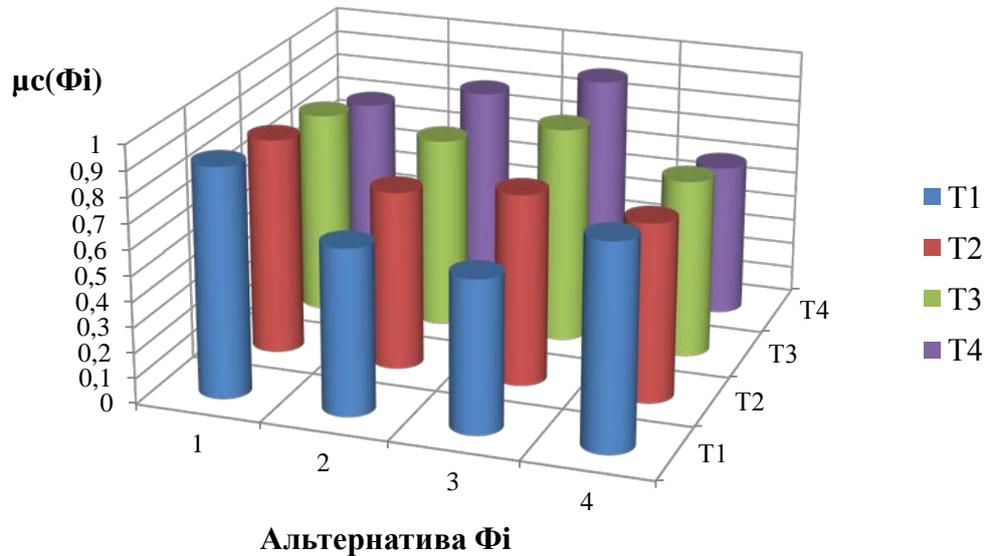


Рисунок 4.1. Оценки альтернатив при одинаковой важности критериев (требований)

На основании таблицы 4.1 и рисунка 4.1 получены следующие данные, характеризующие степень принадлежности ФКУ заданным требованиям:

$$\begin{aligned}
 T_1 &= \{0,9/\Phi_1; 0,65/\Phi_2; 0,6/\Phi_3; 0,8/\Phi_4\}; \\
 T_2 &= \{0,85/\Phi_1; 0,7/\Phi_2; 0,75/\Phi_3; 0,7/\Phi_4\}; \\
 T_3 &= \{0,8/\Phi_1; 0,75/\Phi_2; 0,85/\Phi_3; 0,7/\Phi_4\}; \\
 T_4 &= \{0,7/\Phi_1; 0,8/\Phi_2; 0,9/\Phi_3; 0,6/\Phi_4\}.
 \end{aligned} \tag{4.3}$$

Существует несколько правил выбора решений. В соответствии с одним из них сначала находят соответствующие минимальные значения, из которых затем выбирают максимальное, оно указывает на результат:

$$\begin{aligned}
 D &= \max \left\{ \begin{array}{l} \min(0,9; 0,85; 0,8; 0,7/\Phi_1); \min(0,65; 0,7; 0,75; 0,8/\Phi_2); \\ \min(0,6; 0,75; 0,75; 0,8/\Phi_3); \min(0,8; 0,7; 0,7; 0,6/\Phi_4); \end{array} \right\} = \\
 &= \max \{0,7/\Phi_1; 0,65/\Phi_2; 0,6/\Phi_3; 0,6/\Phi_4\}.
 \end{aligned} \tag{4.4}$$

Таким образом, наиболее оптимальным вариантом применения ПФ в качестве ФКУ является первый альтернативный вариант Φ_1 – резонансные ПФ, настроенные на 11-ю и 13-ю гармоники, и ШПФ второго порядка, настроенный на компенсацию ВГ, начиная с 23-й:

$$\Phi_1 = \{0,9; 0,85; 0,8; 0,7\}.$$

На практике требования T_i могут иметь различную важность. Это зависит от конфигурации систем электроснабжения, характера нагрузок, соотношения мощ-

ностей КЗ со стороны системы и преобразователя. Тогда требования T_i имеют различную важность, то каждому из них присваивается степень важности $\alpha_i \geq 0$, (чем важнее критерий, тем больше α_i), и правило выбора принимает вид:

$$D = T_1^{\alpha_1} \cap T_2^{\alpha_2} \cap \dots \cap T_n^{\alpha_n}, \quad (4.5)$$

где $\alpha_i > 0$; $i = 1 \dots n$; $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$.

Коэффициенты относительной важности определяются на основе процедуры парного сравнения критериев. Вначале формируется матрица парных сравнений M , элементы которой находятся из таблицы 4.2 и удовлетворяют следующим условиям: $m_{ii} = 1$; $m_{ij} = 1/m_{ji}$:

$$M = (m_{ij}) = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & \dots & m_{1n} \\ m_{21} & m_{22} & \dots & m_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ m_{n1} & m_{n2} & \dots & m_{nn} \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

Для целей экспертного оценивания принята 9-балльная шкала в соответствии с методом анализа иерархий Саати (таблица 4.2) [135, 136].

Таблица 4.2 – Шкала относительной важности

| Интенсивность относительной важности в баллах | Определение | Объяснение |
|---|--|--|
| 1 | Равная важность | Важность требований (факторов) T_i и T_j одинакова |
| 3 | Умеренное превосходство одного над другим | Опыт и суждения дают легкое превосходство одному требованию (фактору) над другим |
| 5 | Существенное или сильное превосходство | Имеющиеся данные свидетельствуют о заметном превосходстве T_i над T_j |
| 7 | Очень сильное превосходство | Превосходство объекта (фактора) T_i над T_j очевидно |
| 9 | Абсолютное превосходство | Очевидность превосходства T_i над T_j подтверждается всеми имеющимися признаками |
| 2, 4, 6, 8 | Промежуточные решения между двумя соседними суждениями | Применяются в компромиссных случаях |

Шкала относительной важности содержит и все обратные числа $1/9, 1/7, 1/5, 1/3$ и промежуточные значения $1/8, 1/6, 1/4, 1/2$.

Затем определяется параметр w – собственный вектор матрицы M , соответствующий максимальному собственному значению z_{max} .

Искомые значения коэффициентов α_i получаются умножением элементов w на n для выполнения условия

$$\alpha_i = n \cdot w_i. \quad (4.7)$$

В соответствии со шкалой относительной важности сформирована матрица парных сравнений представленных выше требований, предъявляемых к ФКУ:

$$M = (m_{ij}) = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 3 & 2 \\ 1 & 1 & 5 & 3 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & 1 & 1 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{3} & 1 & 1 \end{pmatrix}.$$

Принята равная важность требований T_1 и T_2 (капитальных затрат и свойства частотных характеристик «фильтр – внешняя сеть»); умеренное превосходство требования T_1 над требованиями T_3 и T_4 (превосходство капитальных затрат над потерями мощности в элементах ФКУ и способностью компенсации реактивной мощности на основной гармонике); более существенное превосходство требования T_2 над требованиями T_3 и T_4 (существенное превосходство свойства частотных характеристик над потерями мощности в элементах ФКУ и способностью компенсации реактивной мощности на основной гармонике); а также равная важность требований T_3 и T_4 (потерь мощности в элементах ФКУ и способностей компенсации реактивной мощности на основной гармонике).

Собственный вектор матрицы парных сравнений:

$$w = \begin{pmatrix} 0,591 \\ 0,745 \\ 0,192 \\ 0,241 \end{pmatrix}.$$

Тогда коэффициенты относительной важности требований:

$$\alpha_1 = n \cdot w_1 = 4 \cdot 0,591 = 2,364;$$

$$\alpha_2 = n \cdot w_2 = 4 \cdot 0,745 = 2,98;$$

$$\alpha_3 = n \cdot w_3 = 4 \cdot 0,192 = 0,768;$$

$$\alpha_4 = n \cdot w_4 = 4 \cdot 0,241 = 0,964.$$

Модификация множеств требований:

$$T_1^{\alpha_1} = T_1^{2,364} = \{0,9^{2,364} / \Phi_1; 0,65^{2,364} / \Phi_2; 0,6^{2,364} / \Phi_3; 0,8^{2,364} / \Phi_4\} = \\ = \{0,78 / \Phi_1; 0,361 / \Phi_2; 0,299 / \Phi_3; 0,59 / \Phi_4\};$$

$$T_2^{\alpha_2} = T_2^{2,98} = \{0,85^{2,98} / \Phi_1; 0,7^{2,98} / \Phi_2; 0,75^{2,98} / \Phi_3; 0,7^{2,98} / \Phi_4\} = \\ = \{0,616 / \Phi_1; 0,345 / \Phi_2; 0,424 / \Phi_3; 0,345 / \Phi_4\};$$

$$T_3^{\alpha_3} = T_3^{0,768} = \{0,8^{0,768} / \Phi_1; 0,75^{0,768} / \Phi_2; 0,85^{0,768} / \Phi_3; 0,7^{0,768} / \Phi_4\} = \\ = \{0,843 / \Phi_1; 0,802 / \Phi_2; 0,883 / \Phi_3; 0,76 / \Phi_4\};$$

$$T_4^{\alpha_4} = T_4^{0,964} = \{0,7^{0,964} / \Phi_1; 0,8^{0,964} / \Phi_2; 0,9^{0,964} / \Phi_3; 0,6^{0,964} / \Phi_4\} = \\ = \{0,709 / \Phi_1; 0,806 / \Phi_2; 0,903 / \Phi_3; 0,611 / \Phi_4\}.$$

На рисунке 4.2 представлена оценка альтернатив при различной важности требований T_i , из которого наглядно видна степень влияния каждого критерия на выбор оптимального варианта ФКУ.

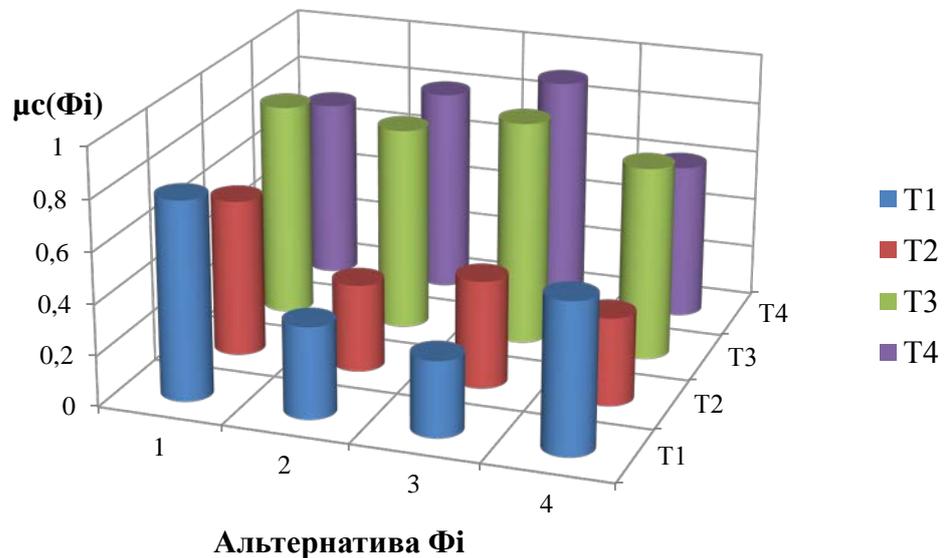


Рисунок 4.2. Оценки альтернатив при различной важности критериев (требований)

Множество, содержащее минимальные значения $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi_4$:

$$D = \{0,616 / \Phi_1; 0,345 / \Phi_2; 0,299 / \Phi_3; 0,345 / \Phi_4\}.$$

Максимальное значение принадлежности имеет альтернатива Φ_I – ФКУ, состоящее из резонансных ПФ, настроенных на 11-ю и 13-ю гармоники, и ШПФ второго порядка, настроенный на компенсацию ВГ, начиная с 23-ей:

$$\Phi_I = \{0,78; 0,616; 0,843; 0,709\}.$$

Решения задач выбора оптимального варианта применения ПФ в качестве ФКУ при одинаковой и различной важности критериев (требований) показали, что наиболее оптимальным вариантом ФКУ является применение резонансных ПФ, настроенных на 11-ю и 13-ю гармоники, и ШПФ второго порядка, настроенного на компенсацию ВГ, начиная с 23-ей.

4.2. Построение имитационных моделей высоковольтных рудничных систем электроснабжения с учетом мощных нелинейных электроприемников и установкой ФКУ

Оценка эффективности компенсации ВГ токов и напряжений в высоковольтной рудничной сети скиповой ПУ выполнена с помощью имитационной модели, разработанной в программном комплексе Matlab с пакетом расширений Simulink и библиотекой SimPowerSystems, дополненной моделями ФКУ (рисунок 4.3). Имитационная модель высоковольтной системы электроснабжения клетевой ПУ, дополненная моделями ФКУ, имеет аналогичную структуру и представлена в приложении Б.

Моделирование резонансных ПФ, настроенных на 11-ю и 13-ю гармоники, осуществлялось с помощью блоков Series RLC Branch из группы Elements. В настройках блока вводятся следующие параметры [111]:

- Branch type – тип последовательной электрической цепи.
- Resistance R (Ohms) [Сопротивление (Ом)] – величина активного сопротивления.
- Inductance L (H) [Индуктивность (Гн)] – величина индуктивности.
- Capacitance C (F) [Емкость (Ф)] – величина емкости.

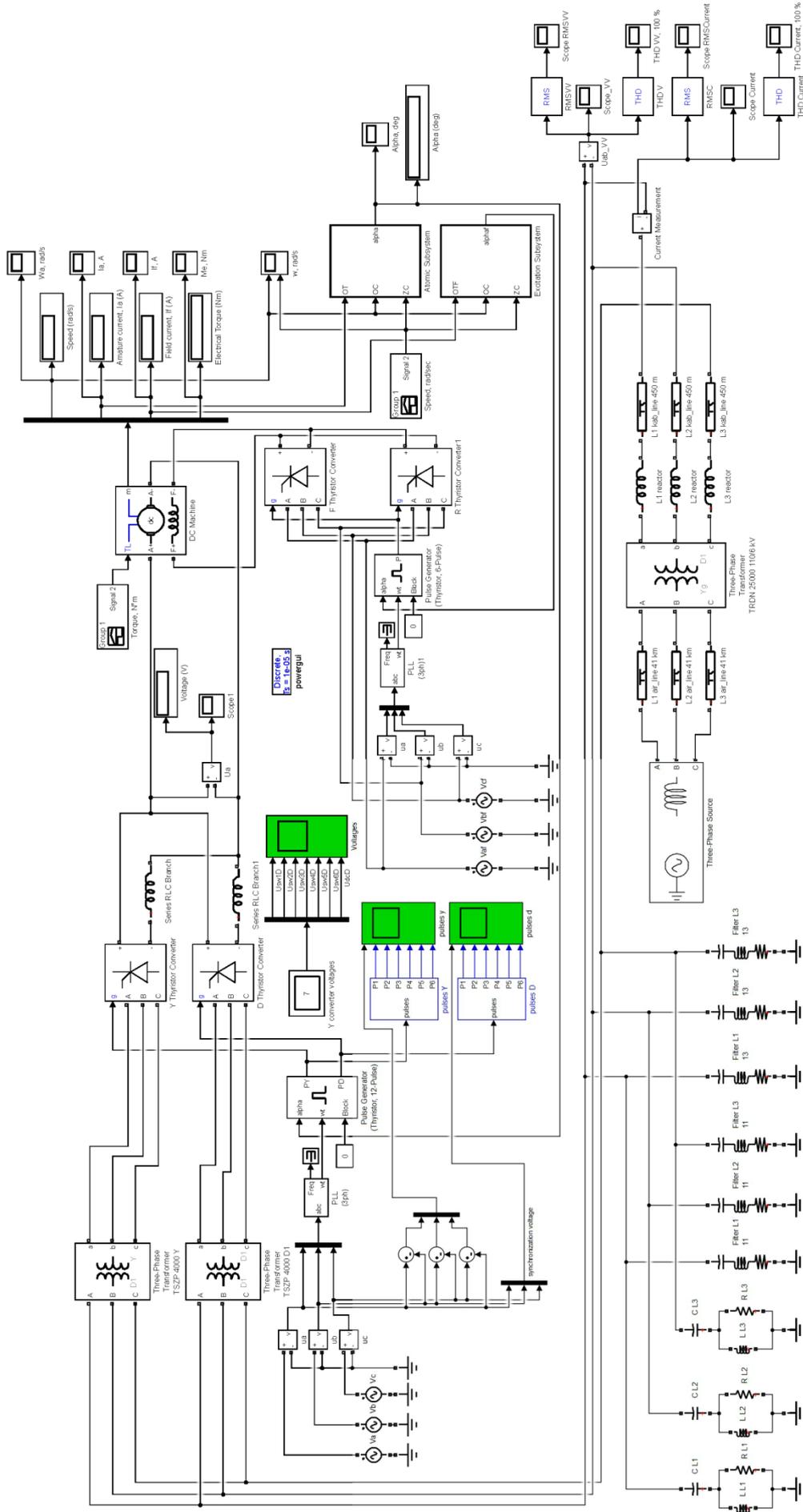
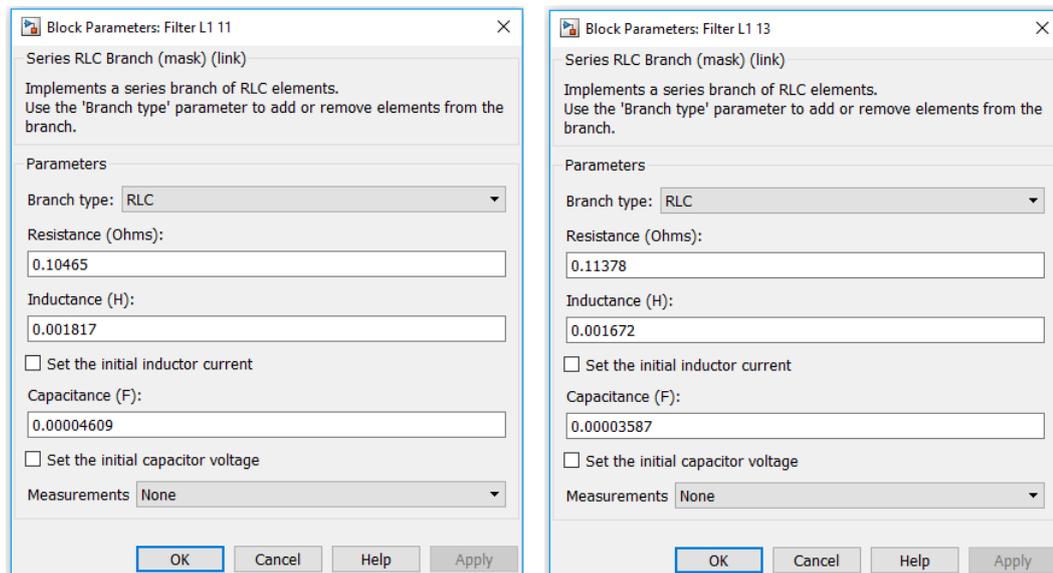
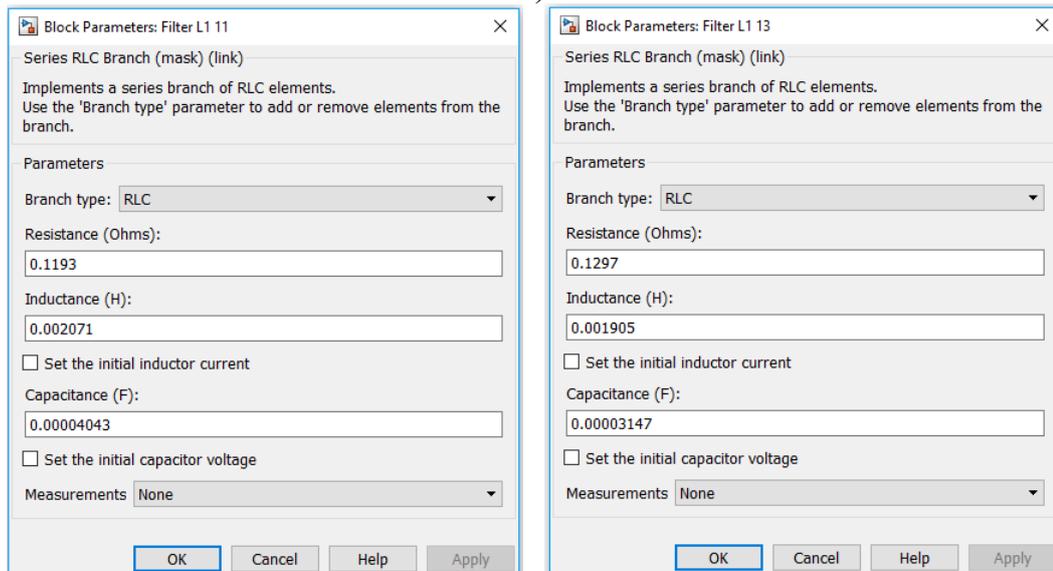


Рисунок 4.3. Имитационная модель высоковольтной системы электроснабжения скиповой ПУ с установкой ФКУ

На рисунке 4.4 представлены окна ввода параметров блоков Series RLC Branch, моделирующих резонансные ПФ в системах электроснабжения скиповой и клетевой ПУ соответственно.



а)

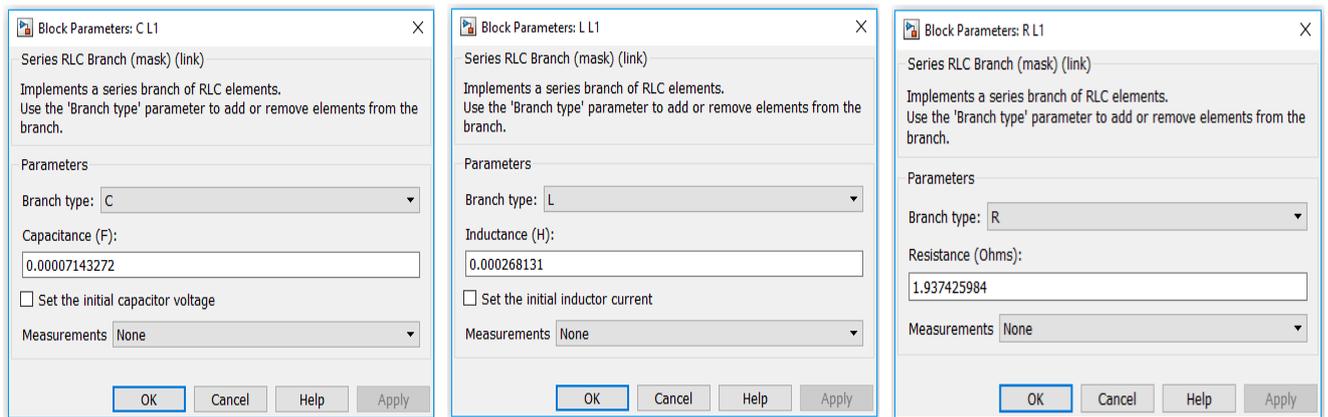


б)

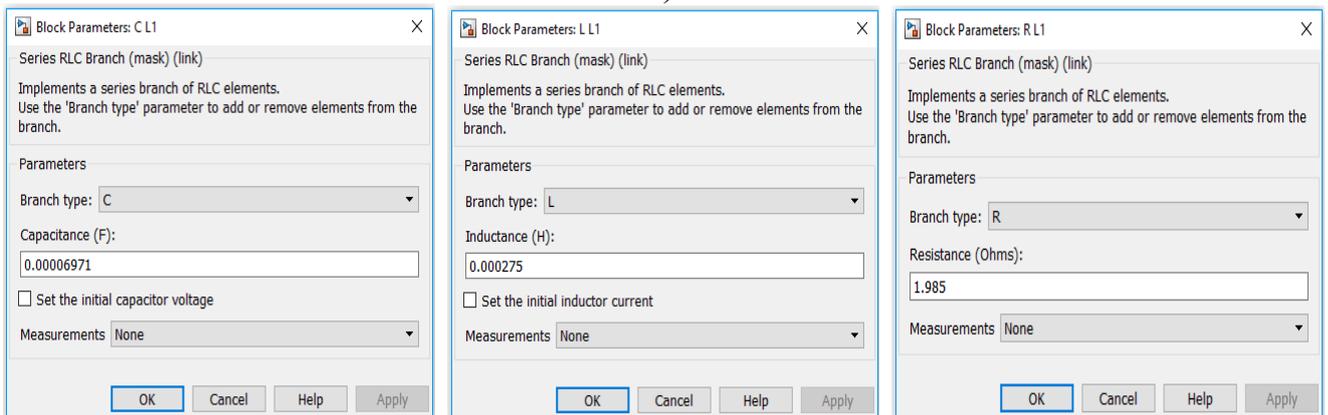
Рисунок 4.4. Окна ввода параметров блоков Series RLC Branch, моделирующих резонансные ПФ в системах электроснабжения:

а – скиповой ПУ; *б* – клетевой ПУ

Моделирование широкополосных ПФ второго порядка, настроенных на компенсацию ВГ, начиная с 23-ей, выполнено тремя блоками Series RLC Branch из группы Elements. На рисунке 4.5 представлены окна ввода параметров блоков Series RLC Branch, моделирующих широкополосные ПФ, настроенные на компенсацию ВГ, начиная с 23-ей.



а)



б)

Рисунок 4.5. Окна ввода параметров блоков Series RLC Branch, моделирующих широкополосные ПФ второго порядка:

а – скиповая ПУ; *б* – клетевая ПУ

Модели фильтров добавлены в имитационные модели систем электроснабжения скиповой и клетевой ПУ, которые моделируют режимы работы в соответствии с диаграммами движения (см. рисунки 1.4, 1.5). Указанные режимы задаются с помощью блоков Signal Builder. Блок Signal Builder позволяет с помощью графических средств задать форму волны сигналов, выводимых блоком. Пиктограмма блока и окно редактора, в котором задается форма сигнала, показаны на рисунке 4.6. Блок Signal Builder имеет единственный выходной порт. Сигнал на выходе этого порта имеет вид импульса, заданный пользователем. Форму выходного импульса блока можно менять с помощью окна настроек. По умолчанию конструктор создает сигнал в виде прямоугольного импульса. В графическом окне настроек блока можно перемещать линии импульса и придавать им наклон, т.е. менять форму исходного импульса. Форму сигнала можно наблюдать, подключив к выходу блока осциллограф.

В имитационных моделях блоком Signal Builder задаются моменты подъемных двигателей и скорости движения в соответствии с диаграммами движения. На рисунке 4.6. представлены пиктограммы блоков Signal Builder, задающих момент и скорость скиповой ПУ, а также окна настройки форм этих сигналов.

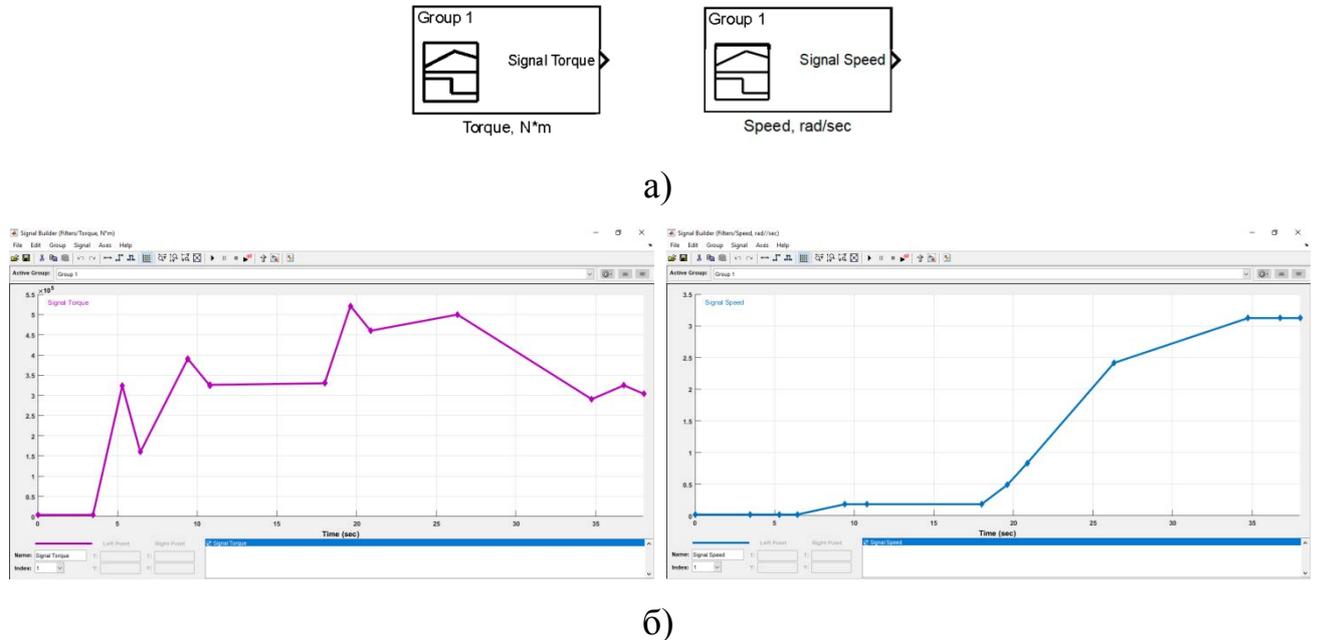


Рисунок 4.6. Пиктограммы (а) и окна настройки форм задающих сигналов (б) по моменту и по угловой скорости для скиповой ПУ

Моделирование с имитационными моделями фильтров проводилось по заданным режимам работы ПУ с помощью блоков Signal Builder.

Проведенный анализ доказал необходимость совместного использования резонансных и широкополосных фильтров.

4.3. Результаты имитационного моделирования в рудничных высоковольтных системах электроснабжения с установленными ФКУ

ФКУ, представленные двумя резонансными ПФ, настроенными на 11-ю и 13-ю гармоники, и ШПФ второго порядка, настроенным на компенсацию ВГ, начиная с 23-ей, представлены имитационной моделью (рисунок 4.7).

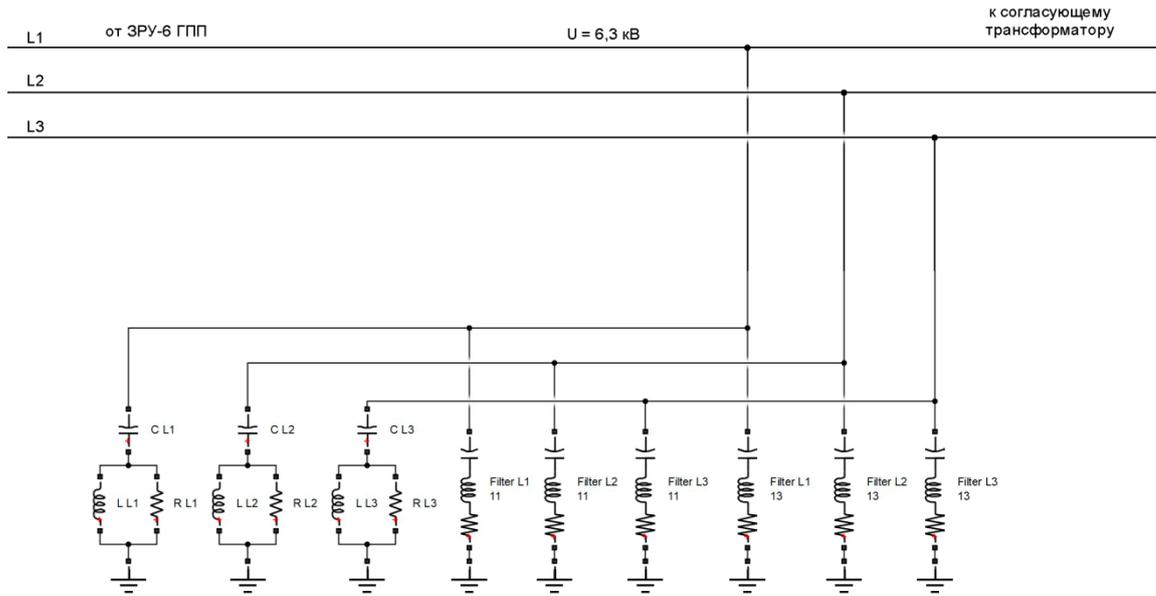


Рисунок 4.7. Имитационная модель фильтрокомпенсирующего устройства

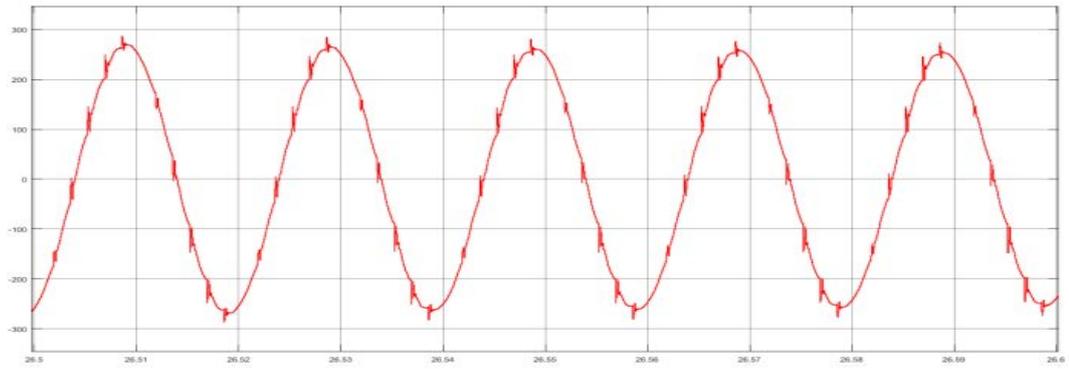
ФКУ устанавливаются в РУ-6 здания подъемных машин, перед согласующими трансформаторами в виде отдельных дополнительных ячеек, подключенным непосредственно к шинам РУ-6.

Результаты имитационного моделирования представлены в таблице 4.3, а также в виде осциллограмм токов и напряжений и спектров ВГ (рисунки 4.8, 4.9).

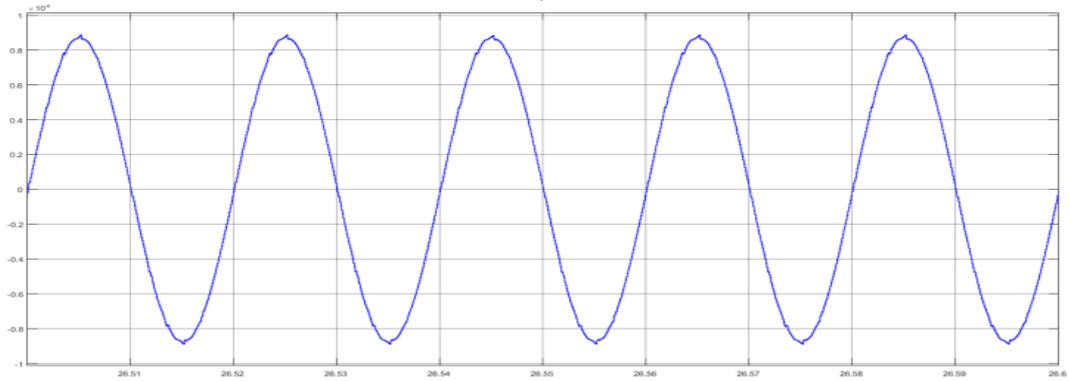
Таблица 4.3 – Результаты имитационного моделирования режимов систем электроснабжения с установленными ФКУ

| Время | U, В | K_U , % | $K_{U(11)}$, % | $K_{U(13)}$, % | $K_{U(23)}$, % | $K_{U(25)}$, % | $K_{U(35)}$, % | $K_{U(37)}$, % |
|-------------|------|-----------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Скиповая ПУ | | | | | | | | |
| 00:00:26* | 6008 | 9,94 | 5,41 | 7,53 | 2,47 | 1,58 | 0,95 | 0,77 |
| 00:00:26** | 6183 | 0,61 | 0,05 | 0,04 | 0,33 | 0,27 | 0,19 | 0,18 |
| Клетевая ПУ | | | | | | | | |
| 00:00:26* | 5794 | 17,07 | 8,90 | 13,08 | 4,33 | 2,83 | 1,65 | 1,35 |
| 00:00:26** | 5924 | 1,2 | 0,11 | 0,10 | 0,65 | 0,55 | 0,38 | 0,37 |
| Время | I, А | K_I , % | $K_{I(11)}$, % | $K_{I(13)}$, % | $K_{I(23)}$, % | $K_{I(25)}$, % | $K_{I(35)}$, % | $K_{I(37)}$, % |
| Скиповая ПУ | | | | | | | | |
| 00:00:26* | 348 | 8,25 | 5,18 | 4,03 | 2,56 | 2,28 | 1,63 | 1,52 |
| 00:00:26** | 188 | 3,72 | 0,06 | 0,07 | 0,64 | 0,74 | 0,62 | 0,69 |
| Клетевая ПУ | | | | | | | | |
| 00:00:26* | 585 | 8,94 | 5,65 | 4,43 | 2,8 | 2,49 | 1,78 | 1,64 |
| 00:00:26** | 455 | 2,66 | 0,08 | 0,04 | 0,51 | 0,59 | 0,5 | 0,55 |

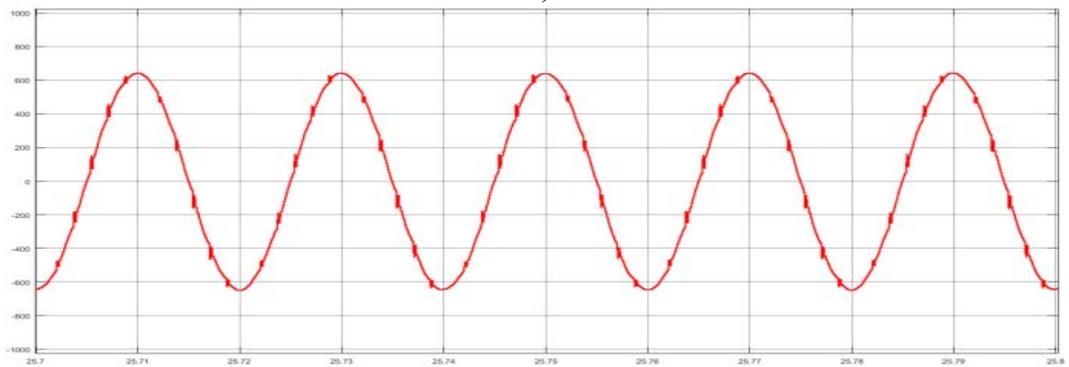
Примечание: * – результаты имитационного моделирования без ФКУ, ** – результаты имитационного моделирования с установленными ФКУ.



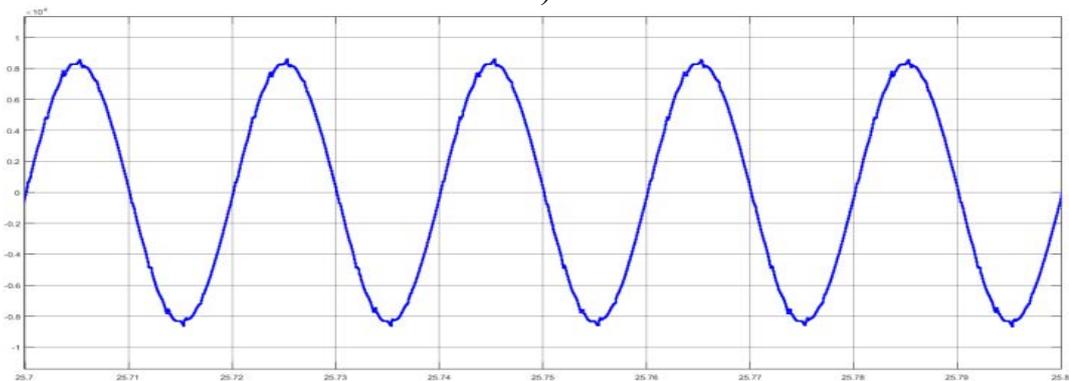
а)



б)



в)



г)

Рисунок 4.8. Осциллограммы режимов в высоковольтной рудничной сети:
a, в – токи скиповой ПУ, клетевой ПУ; *б, г* – напряжения скиповой ПУ, клетевой ПУ

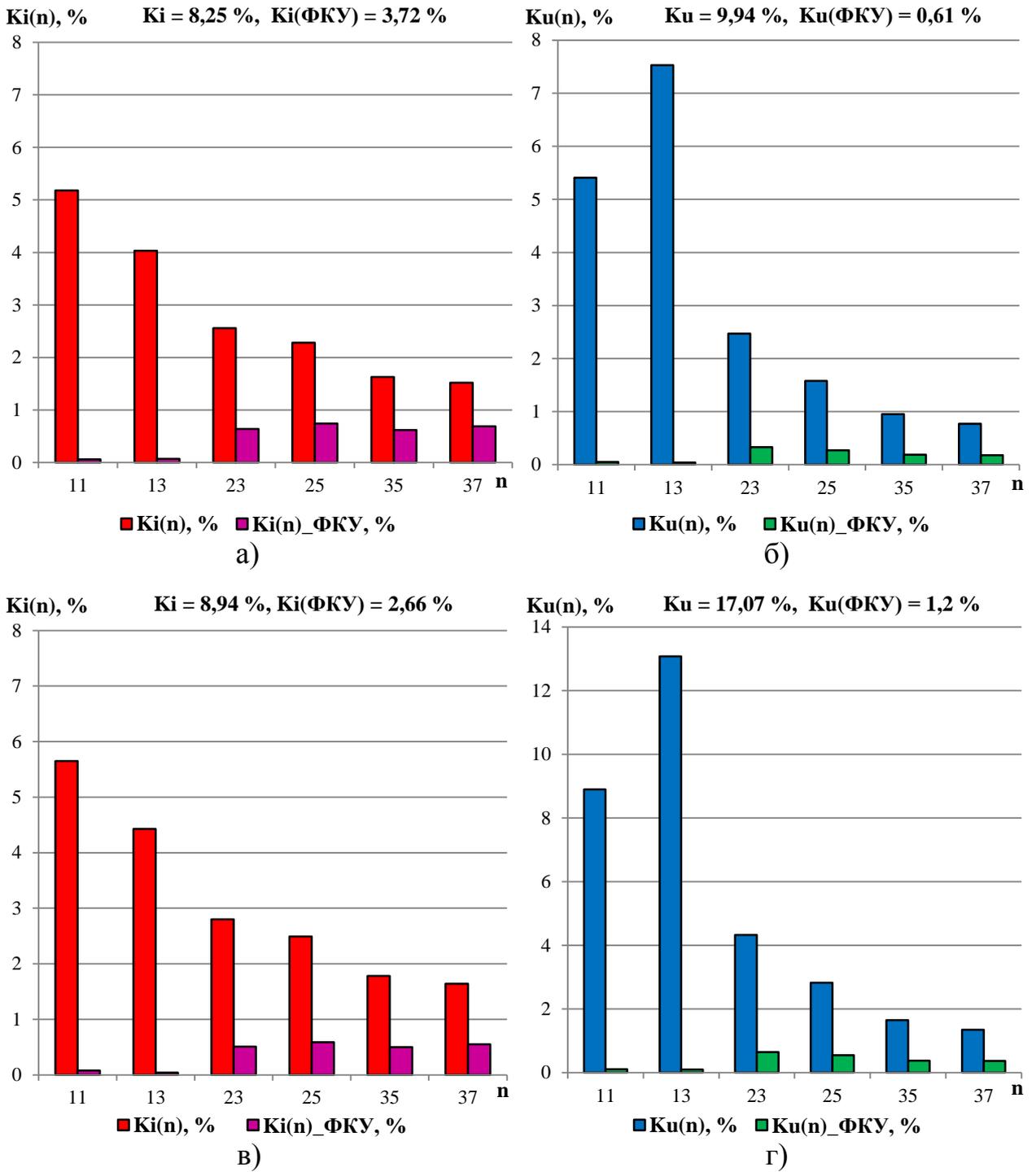


Рисунок 4.9. Спектры гармоник в высоковольтной рудничной сети:

а, в – токов скиповой ПУ, клетевой ПУ; *б, г* – напряжений скиповой ПУ, клетевой ПУ

Как следует из рисунков 4.8, 4.9, токи и напряжения в фазах высоковольтных систем электроснабжения ПУ принимают формы близкие к синусоидальным, а суммарные коэффициенты гармонических составляющих при этом равны:

по току:

– скиповая ПУ: $K_I = 3,72\%$;

– клетевая ПУ: $K_I = 2,66 \%$;

по напряжению:

– скиповая ПУ: $K_U = 0,61 \%$;

– клетевая ПУ: $K_U = 1,2 \%$.

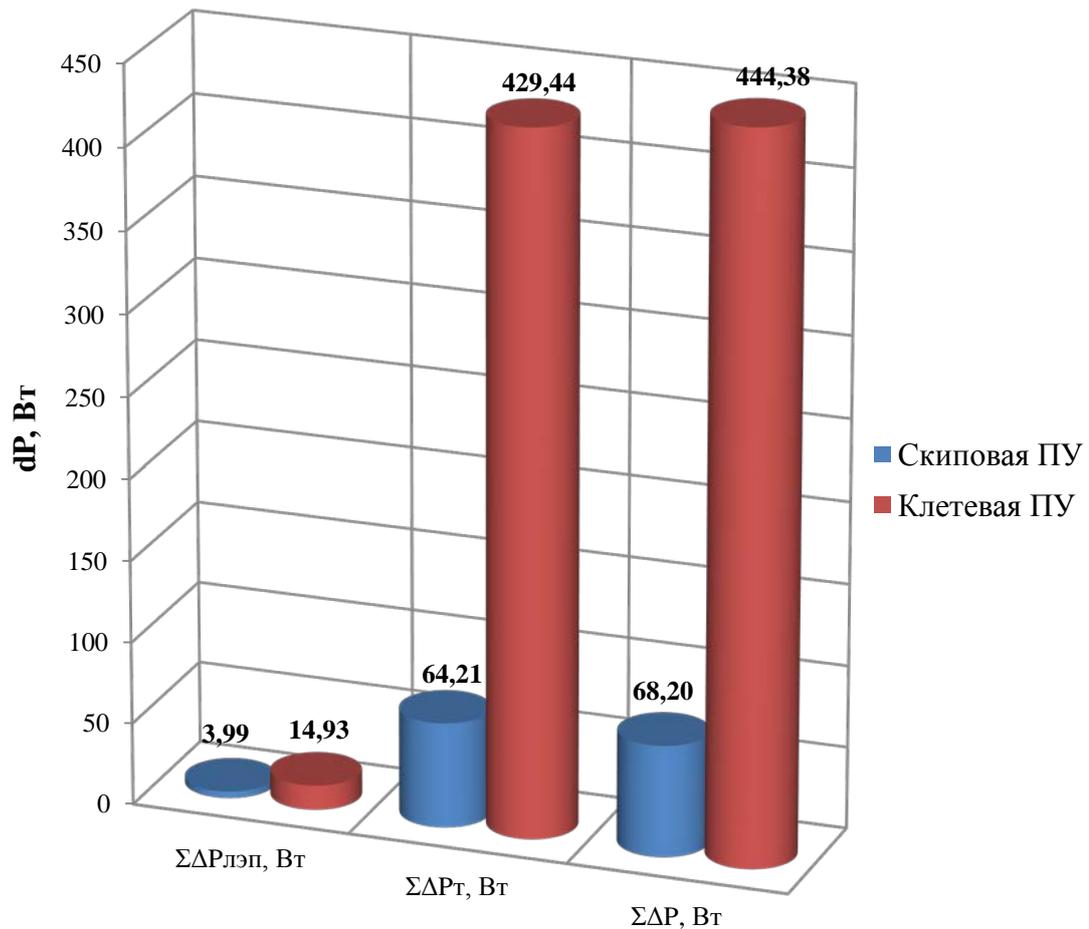
Потери мощности в высоковольтных рудничных сетях, рассчитанные по результатам имитационного моделирования, представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Результаты оценки дополнительных потерь мощности в высоковольтной рудничной сети, рассчитанные по результатам имитационного моделирования при установке ФКУ

| Виды потерь мощности | № гармоники | | | | | | |
|---|--------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | 11 | 13 | 23 | 25 | 35 | 37 | Σ |
| $(\Delta P_{лЭПj} + \Delta P_{Pj})_{\text{дон}}$, Вт | <u>0,01*</u> | <u>0,01</u> | <u>0,81</u> | <u>1,12</u> | <u>0,90</u> | <u>1,14</u> | <u>3,99</u> |
| | 0,06** | 0,01 | 3,01 | 4,16 | 3,44 | 4,26 | 14,93 |
| $(\Delta P_{Tj})_{\text{дон}}$, Вт | <u>0,46</u> | <u>0,31</u> | <u>25,78</u> | <u>17,88</u> | <u>10,30</u> | <u>9,48</u> | <u>64,21</u> |
| | 3,69 | 3,18 | 165,36 | 122,71 | 68,18 | 66,33 | 429,44 |
| $\Delta P_{\text{дон}j}$, Вт | <u>0,47</u> | <u>0,32</u> | <u>26,59</u> | <u>19,00</u> | <u>11,20</u> | <u>10,63</u> | <u>68,20</u> |
| | 3,74 | 3,19 | 168,37 | 126,87 | 71,61 | 70,59 | 444,38 |

Примечание: * – для скиповой ПУ; ** – для клетевой ПУ.

Гистограмма дополнительных потерь мощности в элементах высоковольтных систем электроснабжения скиповой и клетевой ПУ при установке ФКУ представлена на рисунке 4.10.



Виды потерь мощности

Рисунок 4.10. Гистограмма дополнительных потерь мощности в высоковольтных системах электроснабжения скиповой и клетевой ПУ при установке ФКУ

Как следует из результатов моделирования дополнительные потери мощности, вызванные несинусоидальными режимами работы при установке ФКУ, снизились более чем на 98 % и составили $\Delta P = 0,51$ кВт. Таким образом, компенсация ВГ токов и напряжений способствует снижению дополнительных потерь мощности в элементах высоковольтных систем электроснабжения скиповой и клетевой ПУ при несинусоидальных режимах работы.

4.4. Оценка экономической эффективности установки выбранных фильтрокомпенсирующих устройств

Для определения экономической эффективности реализуемых технических мероприятий выполняется их оценка потенциальной способности сохранять оку-

паемость вложенных финансовых средств и обеспечивать рост экономической эффективности их применения [137].

Для выполнения такой оценки определяются следующие экономические показатели предлагаемого проекта установки ФКУ:

- финансовые поступления, связанные с реализацией проекта (F_i);
- затраты, связанные с реализацией проекта (Q_i);
- коэффициент дисконтирования (D_i);
- чистый денежный поток (FCF_i);
- чистая дисконтированная стоимость (NPV_i);
- накопленная дисконтированная стоимость (NPV_{Σ});
- индекс рентабельности инвестиции (PI);
- период окупаемости проекта ($T_{ок}$).

Финансовые поступления, связанные с реализацией проекта установки ФКУ, создаются за счет снижения дополнительных потерь мощности при несинусоидальных режимах работы высоковольтной рудничной сети, а также за счет компенсации реактивной мощности.

Дополнительные потери мощности при несинусоидальных режимах работы высоковольтных систем электроснабжения скиповой и клетевой ПУ определены с учетом трендов (детерминированных функций) графиков нагрузок, которые представлены в подразд. 3.1. Усредненные значения потерь мощности скомпенсированных разработанными ФКУ при несинусоидальных режимах работы высоковольтных систем электроснабжения скиповой и клетевой ПУ, соответственно, составили $\Delta P_{донСПУ} = 9,16$ кВт и $\Delta P_{донКПУ} = 24,0$ кВт. Расчет дополнительных потерь энергии за каждый характерный период определялся в соответствии с выражением

$$\Delta W_{перj} = \tau_{перj} \cdot \Delta P_{дон}, \quad (4.8)$$

где $\tau_{перj}$ – длительность характерного периода работы ПУ, ч; $\Delta P_{дон}$ – усредненное за характерный период работы ПУ значение мощности, определенное на основании трендов, кВт.

Дополнительные потери мощности в течение рабочего дня зависят от объе-

ма добываемой руды и количества спусков и подъемов каждой ПУ. Согласно журналам подъемных установок, а также графикам электрических нагрузок за рабочий день, состоящий из трех смен, в среднем можно выделить по 3–4 характерных периода работы каждой ПУ, со средней длительностью работы от 1 ч до 3 ч (таблица 4.5).

Таблица 4.5 – Характерные периоды работы ПУ

| Тип подъемной установки | 1-й период, <u>интервал, ч, мин</u> длительность, ч | 2-й период <u>интервал, ч, мин</u> длительность, ч | 3-й период <u>интервал, ч, мин</u> длительность, ч | 4-й период <u>интервал, ч, мин</u> длительность, ч |
|--|---|--|--|--|
| Скиповая ПУ (выдача руды) | <u>1:00 – 3:00</u> 2,0 | <u>4:30 – 6:30</u> 2,0 | <u>17:00 – 20:00</u> 3,0 | <u>21:00 – 22:30</u> 1,5 |
| Клетевая ПУ (выдача породы) | <u>3:00 – 4:00</u> 1,0 | <u>6:30 – 7:30</u> 1,0 | <u>20:00 – 21:00</u> 1,0 | <u>22:30 – 23:30</u> 1,0 |
| Клетевая ПУ (спуск-подъем рабочих смен, оборудования) | <u>23:30 – 0:30</u> 1,0 | <u>7:30 – 8:30</u> 1,0 | <u>15:30 – 16:30</u> 1,0 | – |

С учетом количества характерных периодов работы ПУ и их длительности, дополнительные потери электроэнергии за год каждой из ПУ определены по формуле:

$$\Delta W_T = D \cdot \Delta W_{пер} = D \cdot \sum_{j=1}^N \Delta W_{перj}, \quad (4.9)$$

где D – количество дней в году ($D = 365$ рабочих дней); N – количество характерных периодов работы ПУ за сутки.

Для промышленных потребителей с максимальной мощностью энергопринимающих устройств свыше 10 МВт, рассчитывающихся по договорам купли-продажи, тариф на электроэнергию составляет $T_a = 3,15$ руб/кВт·ч. Размер ежегодных финансовых поступлений, связанных с установкой разработанных ФКУ за счет экономии затрат на дополнительные потери электроэнергии, определялись следующим образом:

$$F_i = (\Delta W_{TC} + \Delta W_{TK}) \cdot T_a, \quad (4.10)$$

где $\Delta W_{ТС}$, $\Delta W_{ТК}$ – дополнительные потери электроэнергии за год в системе электроснабжения скиповой и клетевой ПУ соответственно, кВт·ч; T_a – тариф на электроэнергию, руб/кВт·ч.

Результаты расчета ежегодных финансовых поступлений, связанных с установкой разработанных ФКУ за счет экономии затрат на дополнительные потери электроэнергии, представлены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Результаты оценки экономической выгоды от компенсации ВГ токов и напряжений в высоковольтной рудничной сети

| Тип установки | $\Delta P_{дон}$, кВт | $\tau_{сут}$, ч | $W_{пер}$, кВт·ч | W_T , кВт·ч / год | \mathcal{E} , тыс. руб / год | F_i , тыс. руб / год |
|---------------|------------------------|------------------|-------------------|---------------------|--------------------------------|------------------------|
| Скиповая ПУ | 9,16 | 8,5 | 78 | 28419 | 89,52 | 282,68 |
| Клетевая ПУ | 24,0 | 7 | 168 | 61320 | 193,16 | |

Потери от высших гармоник в элементах систем электроснабжения ПУ имеют значительную величину и составляют от 17 до 44 % от общих потерь мощности. Экономическая выгода от компенсации дополнительных потерь при помощи установки ФКУ в системах электроснабжения ПУ составила более 282 тыс. руб за один год.

Все затраты, связанные с внедрением ФКУ, можно разделить на три составляющие [137]: капитальные затраты, связанные с покупкой оборудования, эксплуатационные затраты и амортизация.

В системе электроснабжения скиповой ПУ к установке приняты два резонансных фильтра на 11-ю и 13-ю гармоники и широкополосный фильтр второго порядка суммарной мощностью 1151 квар серии УКПФ 57. В системе электроснабжения клетевой ПУ к установке приняты аналогичные типы фильтров суммарной мощностью 1089 квар серии УКПФ 57. Стоимость ФКУ определена в зависимости от мощности по данным производителя [138].

Стоимость установок ФКУ для обеих ПУ составила по 247,7 тыс. руб [138].

Капитальные затраты в первый год реализации проекта установки ФКУ:

$$Q_1 = K_0 + K_{mp} + K_m + K_n + A \cdot K_0, \quad (4.11)$$

где K_0 – капитальные затраты на оборудование, тыс. руб.; K_{mp} – транспортные расходы, тыс. руб.; K_m – расходы на монтаж оборудования, тыс. руб.; K_n – расходы на наладку и опробование оборудования, тыс. руб.; A – годовая ставка амортизации в первый год эксплуатации ФКУ, $A = 0,083$. Срок службы ФКУ составляет 12 лет [139, 140].

Расчет капитальных затрат в первый год реализации проекта установки ФКУ представлен в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Капитальные затраты на реализацию проекта установки ФКУ

| Затраты | Сумма, тыс. руб |
|---|-----------------|
| Капитальные затраты на оборудование K_0 | 495,4 |
| Транспортные расходы K_{mp} (10 % от K_0) | 49,54 |
| Расходы на монтаж оборудования K_m (10 % от K_0) | 49,54 |
| Расходы на наладку и опробование оборудования K_n (5 % от K_0) | 24,77 |
| <i>Итого:</i> | 619,25 |

Затраты на эксплуатацию ФКУ в каждом последующем году состоят из амортизационных отчислений от суммы капитальных затрат на оборудование и от суммы затрат на техническое обслуживание с учетом годовой ставки амортизации:

$$Q_i = A \cdot (K_0 + K_{mo}), \quad (4.12)$$

где K_0 – капитальные затраты на оборудование, тыс. руб.; K_{mo} – затраты на техническое обслуживание, $K_{mo} = P_{mo} \cdot K_0$, тыс. руб.; P_{mo} – процент отчислений на техническое обслуживание, $P_{mo} = 6,4$ %; A – годовая ставка амортизации, которая является величиной, обратной сроку службы ФКУ.

Чистый денежный поток за каждый год эксплуатации ФКУ представляет собой разность между годовыми финансовыми поступлениями и годовыми затратами, связанными с реализацией проекта установки ФКУ [137]:

$$CFC_i = F_i - Q_i. \quad (4.13)$$

Чистая текущая дисконтированная стоимость разработки в i -м году с учетом коэффициента дисконтирования [137]:

$$NPV_i = CFC_i \cdot D_i = CFC_i \cdot \frac{1}{(1+r)^i}, \quad (4.14)$$

где D_i – коэффициент дисконтирования в i -м году реализации проекта установки ФКУ; r – ставка дисконтирования, $r = 0,1$.

Накопленная дисконтированная стоимость [137]:

$$NPV_n = \sum_{i=1}^n NPV_i, \quad (4.15)$$

где n – количество лет реализации проекта установки ФКУ, $n = 12$ [139, 140].

Индекс рентабельности PI определен как отношение дисконтированных финансовых поступлений к дисконтированным затратам на реализацию проекта установки ФКУ [137]:

$$PI = \frac{\sum_{i=1}^{12} \left(F_i \cdot \frac{1}{(1+r)^i} \right)}{\sum_{i=1}^{12} \left(Q_i \cdot \frac{1}{(1+r)^i} \right)}. \quad (4.16)$$

Индекс рентабельности составил $PI = 1,64$.

Результаты расчета показателей экономической эффективности проекта установки ФКУ представлены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Результаты расчета показателей экономической эффективности

| Год реализации | 1-й | 2-й | 3-й | 4-й | 5-й | 6-й | 7-й | 8-й | 9-й | 10-й | 11-й |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Ежегодная экономия, тыс. руб. | 283 | 283 | 283 | 283 | 283 | 283 | 283 | 283 | 283 | 283 | 283 |
| Ежегодные затраты, тыс. руб. | 671 | 48 | 53 | 59 | 66 | 75 | 88 | 105 | 132 | 176 | 264 |
| Капитальные затраты, тыс. руб. | 619 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Амортизационные отчисления, тыс. руб. | 52 | 48 | 53 | 59 | 66 | 75 | 88 | 105 | 132 | 176 | 264 |
| Чистый денежный поток CFC_i , тыс. руб. | -388 | 235 | 230 | 224 | 217 | 207 | 195 | 177 | 151 | 107 | 19 |
| Коэффициент дисконтирования | 0,909 | 0,826 | 0,751 | 0,683 | 0,621 | 0,564 | 0,513 | 0,467 | 0,424 | 0,386 | 0,350 |
| Чистая текущая дисконтированная стоимость NPV_i , тыс. руб. | -353 | 194 | 173 | 153 | 135 | 117 | 100 | 83 | 64 | 41 | 7 |
| Накопленная дисконтированная стоимость NPV_{Σ} , тыс. руб. | -353 | -159 | 14 | 167 | 302 | 419 | 519 | 601 | 665 | 707 | 713 |

Период возврата инвестиций представляет собой период времени, за который суммарные инвестиции сравниваются с суммой доходов от эксплуатации внедрения разработки [137]:

$$T_{\text{воз}} = t_x + \frac{NPV_{\Sigma(t_x)}}{NPV_{i(t_x+1)}}, \quad (4.17)$$

где t_x – количество лет с отрицательной накопленной дисконтированной стоимостью; $NPV_{\Sigma t_x}$ – значение накопленной дисконтированной стоимости, с отрицательным эффектом, в году t_x , взятое по модулю; $NPV_{i(t_x+1)}$ – значение чистой текущей дисконтированной стоимости в году t_x+1 .

По результатам расчета показателей экономической эффективности проекта установки ФКУ построен финансовый профиль (рисунок 4.11).

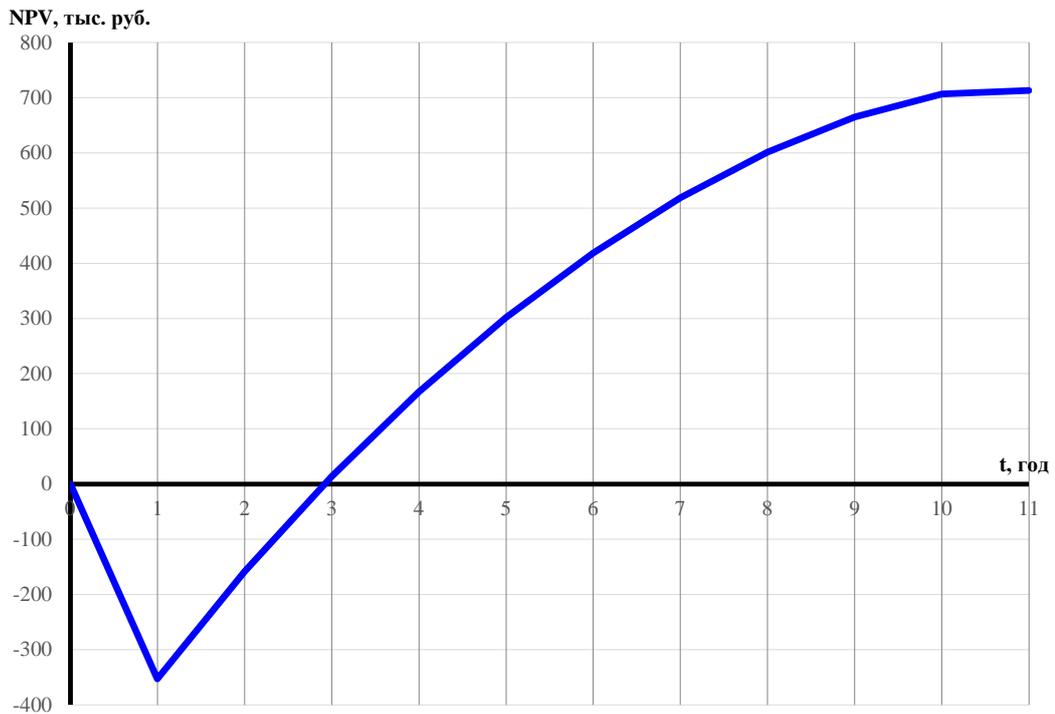


Рисунок 4.11. Финансовый профиль проекта установки ФКУ

На основании расчета накопленной дисконтированной стоимости период возврата капиталовложений составил 2,9 года. По результатам расчета показателей экономической эффективности и на основании финансового профиля можно сделать вывод об эффективности установки ФКУ и о целесообразности внедрения предлагаемой разработки.

Выводы

1. Для определения наиболее рациональной конструкции ФКУ выполнено обоснование типов ПФ на базе решения многокритериальной задачи оптимизации с использованием аппарата нечетких множеств. В результате наиболее оптимальным ФКУ является сочетание двух резонансных ПФ, настроенных на 11-ю и 13-ю гармоники, и широкополосного ПФ второго порядка, настроенного на компенсацию гармоник, начиная с 23-й и выше.

2. Установка ФКУ позволяет повысить качество питающего напряжения за счет компенсации ВГ токов и напряжений. При этом коэффициенты, характеризующие ЭМС, снизились и, соответственно, составили:

- скиповая ПУ – $K_I = 3,72 \%$, $K_U = 0,61 \%$;
- клетевая ПУ – $K_I = 2,66 \%$, $K_U = 1,2 \%$.

При этом дополнительные суммарные потери мощности, вызванные несинусоидальными режимами работы, при установке ФКУ снизились более чем на 98 % и составили $\Delta P = 0,51$ кВт.

3. Период возврата капиталовложений на установку ФКУ составил 2,9 года при капитальных затратах в ценах 2018 г. 619,25 тыс. руб. Ежегодная экономическая выгода от компенсации дополнительных потерь мощности при использовании ФКУ в системах электроснабжения ПУ составила 283 тыс. руб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Рассмотрены особенности построения рудничных высоковольтных систем электроснабжения ПУ на примере Яковлевского рудника Белгородской области. Установлено, что мощные электроприводы подъемных установок, выполненные по системе ТП-Д, оказывают значительное влияние на качество электроэнергии и потери мощности в элементах высоковольтной рудничной сети. Экспериментально подтверждено, что наиболее выраженными являются 11, 13, 23, 25, 35 и 37-я гармоники токов и напряжений. Уровень неканонических и интергармоник значительно ниже уровня канонических гармоник, начиная с 11-й. Отсутствуют физические предпосылки генерирования 3-й гармоники в сеть из-за высоких требований к симметрии фаз. Уровень 5-й и 7-й гармоник демпфируется согласующими трансформаторами. При этом результаты экспериментальных исследований подтверждены аналитическими расчетами. Суммарные коэффициенты гармонических составляющих токов и напряжений в высоковольтной рудничной сети достигают в среднем соответственно $K_I = 8\text{--}10\%$ и $K_U = 12\text{--}17\%$. Для уменьшения отрицательного влияния ВГ токов и напряжений и повышения качества электроэнергии требуется установка ФКУ.

2. Разработаны имитационные модели высоковольтных рудничных систем электроснабжения скиповой и клетевой ПУ с учетом мощных тиристорных электроприводов, выполненных по системе ТП-Д, в системе Matlab с пакетом расширений Simulink и библиотекой SimPowerSystems. С помощью моделей произведена оценка ЭМС при динамических режимах работы и подтвержден высокий уровень гармоник токов и напряжений, начиная с 11-й.

3. Выполнена идентификация параметров и определение вероятностных характеристик токов нагрузок и искажений. Результаты идентификации показывают, что изменения токов нагрузок и искажений относятся к случайным стационарным процессам. Количественные характеристики случайных процессов позволили выявить наиболее вероятный диапазон изменения значений токов нагрузок и искажений. На основе проведенной идентификации выполнена оценка дополни-

тельных потерь мощности в элементах высоковольтных систем электроснабжения при несинусоидальных режимах. При этом дополнительные потери мощности составили от 16,5 до 44 % от основных потерь. Таким образом, это является дополнительным подтверждением применения ФКУ.

4. Предложен и обоснован вариант конструкции ФКУ на базе решения многокритериальной задачи оптимизации с использованием аппарата нечетких множеств. С этой целью выполнен расчет параметров ПФ и частотных характеристик эквивалентных систем типа «ПФ – внешняя сеть» для четырех возможных сочетаний ПФ. Оптимальным является ФКУ с двумя резонансными ПФ, настроенными на 11-ю и 13-ю гармоники, и широкополосным ПФ второго порядка, настроенным на компенсацию гармоник начиная с 23-й и выше. Анализ результатов имитационного моделирования показал эффективную компенсацию ВГ токов и напряжений. При этом суммарные коэффициенты гармонических составляющих по току и напряжению соответственно составили:

- скиповая ПУ – $K_I = 3,72 \%$, $K_U = 0,61 \%$;
- клетевая ПУ – $K_I = 2,66 \%$, $K_U = 1,2 \%$.

Дополнительные суммарные потери мощности при установке ФКУ снизились более чем на 98 % и составили $\Delta P = 0,51$ кВт.

Период возврата капиталовложений на установку ФКУ составил 2,9 года при капитальных затратах в ценах 2018 г. 619,25 тыс. руб. Ежегодная экономическая выгода от компенсации дополнительных потерь мощности при использовании ФКУ в системах электроснабжения ПУ составила 283 тыс. руб.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АПФЭ – активный параллельный фильтр электроэнергии;

АФ – активный фильтр;

АФГ – активный фильтр гармоник;

ВГ – высшие гармоники;

ВЛ – воздушная линия;

ВН – высшее напряжение;

ГПП – главная понизительная подстанция;

ГФ – гибридный фильтр;

ЗПМ – здание подъемных машин;

ЗРУ – закрытое распределительное устройство;

КЗ – короткое замыкание;

КЛ – кабельная линия;

КПУ – клетевая подъемная установка;

КЭ – качество электрической энергии;

ЛЭП – линия электропередачи;

МЭК – Международная электротехническая комиссия;

НН – низшее напряжение;

ОРУ – открытое распределительное устройство;

ПС – подстанция;

ПУ – подъемная установка;

ПФ – пассивный фильтр;

ПФГ – пассивный фильтр гармоник;

ПФСН – пассивный фильтр специальной настройки;

РПН – регулирование напряжения под нагрузкой;

РУ – распределительное устройство;

СПУ – скиповая подъемная установка;

Т – трансформатор;

ТС – техническое средство;

ТП-Д – тиристорный преобразователь – двигатель постоянного тока;

ФЗ – федеральный закон;

ФКУ – фильтрокомпенсирующее устройство;

ЦПП – центральные подземные подстанции;

ШПФ – широкополосный фильтр;

ЭДС – электродвижущая сила;

ЭМС – электромагнитная совместимость;

ЭЭС – электроэнергетическая система;

Matlab – (англ. Matrix Laboratory) пакет прикладных программ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамович, Б.Н. Повышение качества электрической энергии с помощью параллельного активного фильтра в системах электроснабжения промышленных предприятий / Б.Н. Абрамович, Ю.А. Сычев // *Электричество*. – 2012. – № 3. – С. 7а–11.
2. Абрамович, Б.Н. Повышение качества электрической энергии и обеспечение электромагнитной совместимости электрооборудования в сетях нефтедобывающих предприятий с помощью параллельного активного фильтра / Б.Н. Абрамович, Ю.А. Сычев, Д.А. Устинов // *Технологии электромагнитной совместимости*. – 2013. – № 1 (44). – С. 39–43.
3. Проблема обеспечения электромагнитной совместимости конденсаторных установок и активных фильтров в сетях нефтепромыслов / Б.Н. Абрамович, А.В. Медведев, В.В. Старостин и др. // *Нефтяное хозяйство*. – 2010. – № 4. – С. 112–114.
4. Абрамович, Б.Н. Система контроля и повышения качества электрической энергии в сетях предприятий минерально-сырьевого комплекса / Б.Н. Абрамович, В.В. Полищук, Ю.А. Сычев // *Горное оборудование и электромеханика*. – 2009. – № 9. – С. 42–47.
5. Пат. 2354025 Российская Федерация, МПК⁷ Н 02 J 3/18. Способ компенсации высших гармоник и коррекции коэффициента мощности сети / Б.Н. Абрамович, В.В. Полищук, Ю.А. Сычев; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный горный институт имени Г. В. Плеханова (технический университет)». – № 2008117891/09; заявл. 04.05.08; опубл. 27.04.09, Бюл. № 12. – 9 с.
6. Пат. 2413350 Российская Федерация, МПК⁷ Н 02 J 3/18. Способ компенсации высших гармоник и коррекции коэффициента мощности сети / Б.Н. Абрамович, В.В. Полищук, Ю.А. Сычев; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный горный институт имени Г. В. Плеханова

(технический университет)». – № 2009146366/07; заявл. 14.12.09; опубл. 27.02.11, Бюл. № 6. – 8 с.

7. Агунов, А.В. О построении систем управления качеством электроэнергии / А.В. Агунов, Т.С. Титова, В.А. Кручек // Электротехника. – 2016. – № 5. – С. 14–19.

8. Аррилага, Д. Гармоники в электрических системах: пер. с англ. / Д. Аррилага, Д. Бредли, П. Боджер. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.

9. Вагин, Г.Я. К вопросу о нормировании несинусоидальности напряжения и ущерба от высших гармоник / Г.Я. Вагин, С.Н. Юртаев // Промышленная энергетика. – 2017. – № 1. – С. 43–47.

10. Добрусин, Л.А. Приоритеты управления качеством электроэнергии в электрических сетях России: взгляд с позиции национальных интересов и стратегии международного электроэнергетического сотрудничества / Л.А. Добрусин // Силовая электроника. – 2007. – № 2. – С. 82–86.

11. Проблема качества электроэнергии и электросбережения в России / Л.А. Добрусин // Энергоэксперт. – 2008. – № 4(9). – С. 30–35.

12. Довгун, В.П. Адаптивные алгоритмы управления характеристиками активных фильтрокомпенсирующих устройств / В.П. Довгун, С.А. Темербаев // Электричество. – 2012. – № 11. – С. 32–38.

13. Проблемы компенсации высших гармоник в распределительных сетях агропромышленного комплекса: монография / Н.П. Боярская, В.П. Довгун, Я.А. Кунгс. – Красноярск: Краснояр. гос. аграр. ун-т, 2012. – 138 с.

14. Синтез фильтрокомпенсирующих устройств для систем электроснабжения: монография / Н.П. Боярская, В.П. Довгун, Д.Э. Егоров и др.; под ред. В.П. Довгуна. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2014. – 192 с.

15. Довгун, В.П. Синтез пассивных фильтрокомпенсирующих устройств / В.П. Довгун, Н.П. Боярская, В.В. Новиков // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2011. – № 9–10. – С. 31–39.

16. Довгун, В.П. Параметрический синтез пассивных фильтрокомпенсирующих устройств / В.П. Довгун, Д.Э. Егоров, Е.С. Шевченко // Электротехника. – 2016. – № 1. – С. 31–37.

17. Егоров, А.Н. Влияние электропривода с вентильным преобразователем на качество электрической энергии / А.Н. Егоров, Н.М. Кузнецов, О.В. Фёдоров // Энергоэффективность: опыт, проблемы, решения. – 2010. – № 7. – С. 21–23.
18. Качество электрической энергии горных предприятий: монография / Н.М. Кузнецов, Ю.В. Бебихов, А.В. Самсонов и др. – М.: Издательский дом Академии Естествознания, 2012. – 68 с.
19. Жежеленко, И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И.В. Жежеленко. – М.: Энергия, 1974. – 184 с.
20. Жежеленко, И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И.В. Жежеленко. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 331 с.
21. Жежеленко, И.В. Оценка надёжности электрооборудования при пониженном качестве электроэнергии / И.В. Жежеленко, Ю.Л. Саенко, А.В. Горпинич // Вести в электроэнергетике. – 2006. – № 6. – С. 13–17.
22. Жежеленко, И.В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях / И.В. Жежеленко, Ю.Л. Саенко. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 252 с.
23. Жежеленко, И.В. Резонансные фильтры в электрических сетях / И.В. Жежеленко // Электричество. – 1974. – № 7. – С. 32–37.
24. Жежеленко, И.В. Централизованная компенсация несинусоидальности напряжения / И.В. Жежеленко, Ю.Л. Саенко // Электрика. – 2002. – № 5. – С. 10–13.
25. Жежеленко, И.В. Электрические потери от высших гармоник в системах электроснабжения / И.В. Жежеленко // Электрика. – 2010. – № 4. – С. 3–6.
26. Жежеленко, И.В. Электромагнитная совместимость потребителей / И.В. Жежеленко [и др.] – М.: Машиностроение, 2012. – 351 с.
27. Железко, Ю.С. О совершенствовании нормативных документов, определяющих отношения энергоснабжающих организаций и потребителей в части качества электроэнергии и условий потребления реактивной мощности / Ю.С. Железко // Промышленная энергетика. – 2002. – № 6. – С. 23–27.
28. Железко, Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Каче-

ство электроэнергии: руководство для практических расчетов / Ю.С. Железко. – М.: ЭНАС, 2009. – 456 с.

29. Исследование влияния источников высших гармоник на качество электроэнергии в электроэнергетических системах 220–500 кВ / И.И. Карташев [и др.] // Электричество. – 2013. – № 1. – С. 13–18.

30. Карташев, И.И. Ещё раз о качестве электроэнергии / И.И. Карташев // Энергия Единой сети. – 2015. – № 2(19). – С. 4–20.

31. Управление качеством электроэнергии / И.И. Карташев [и др.]; под ред. Ю.В. Шарова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 320 с.

32. Управление качеством электроэнергии: учебное пособие / И.И. Карташев, В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонов [и др.]; под ред. Ю.В. Шарова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательский дом МЭИ, 2017. – 347 с.

33. Оценка работы фильтров в системе электроснабжения горнодобывающего предприятия по результатам контроля качества электроэнергии / И.И. Карташев, В.Н. Тульский, Н.М. Кузнецов и др. // Горное оборудование и электромеханика. – 2012. – № 7. – С. 16–19.

34. Мониторинг показателей качества электрической энергии в системах электроснабжения горных предприятий: монография / И.И. Карташев, В.Н. Тульский, Н.М. Кузнецов, А.С. Семёнов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2013. – 144 с.

35. Коверникова, Л.И. Оптимизационный подход к определению параметров пассивных фильтров / Л.И. Коверникова, Нгуен Чи Тхань, О.В. Хамисов // Электричество. – 2012. – №1. – С. 43–49.

36. Коверникова, Л.И. Качество электроэнергии в ЕЭС России. Текущие проблемы и необходимые решения / Л.И. Коверникова, В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонов // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2016. – № 2(35). – С. 40–50.

37. Коверникова, Л.И. Двухэтапный алгоритм выбора оптимальных параметров пассивного фильтра третьего порядка / Л.И. Коверникова, Нгуен Чи Тхань // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири: материалы Всерос. науч.-практ. конференции с междунар. участием. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2011. – С. 410–416.

38. Коверникова, Л.И. Один из подходов к поиску резонансных режимов на высших гармониках / Л.И. Коверникова, С.С. Смирнов // *Электричество*. – 2005. – № 10. – С. 62–68.
39. Коверникова, Л.И. Об управлении качеством электрической энергии в России в прошлом, настоящем и будущем / Л.И. Коверникова, А.В. Серков, Р.Г. Шамонов // *Энергетическая политика*. – 2018. – № 1. – С. 75–85.
40. Корнилов, Г.П. Современные проблемы электромагнитной совместимости в системах электроснабжения с резкопеременными и нелинейными нагрузками / Г.П. Корнилов, А.Н. Шеметов, А.В. Осипов // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. – 2006. – № 4. – С. 89–93.
41. Анализ показателей качества электроэнергии в системе промышленного электроснабжения с мощными тиристорными электроприводами / А.С. Карандаев, Г.П. Корнилов, Т.Р. Храмшин и др. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. – 2006. – № 3. – С. 6–11.
42. Корнилов, Г.П. Обеспечение электромагнитной совместимости мощных электротехнических комплексов / Г.П. Корнилов, Т.Р. Храмшин, И.Р. Абдулвелеев // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. Энергетика*. – 2015. – Т. 15, № 1. – С. 82–93.
43. Экспериментальные исследования электромагнитной совместимости современных электроприводов в системе электроснабжения металлургического предприятия / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, Т.Р. Храмшин и др. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. – 2016. – Т. 14, № 4. – С. 96–105.
44. Качество электрической энергии горных предприятий: монография / Н.М. Кузнецов, Ю.В. Бебихов, А.В. Самсонов и др. – М.: Издательский дом Академии Естествознания, 2012. – 68 с.
45. Результаты мониторинга показателей качества электрической энергии потребителей подземного рудника / Н.М. Кузнецов, А.С. Семенов, Ю.В. Бебихов и др. // *Горный журнал*. – 2014. – № 1. – С. 23–26.
46. Кузнецов, Н.М. Анализ результатов мониторинга показателей качества электрической энергии в подземном руднике / А.С. Семенов, Н.М. Кузнецов

// Измерительная техника. – 2014. – № 4. – С. 31–34.

47. Кузнецов, Н.М. Влияние электропривода с вентильным преобразователем на качество электрической энергии / Н.М. Кузнецов, О.В. Федоров // Энергоэффективность: опыт, проблемы, решения. – 2010. – № 7. – С. 21.

48. Искажение формы питающего напряжения в сетях электроснабжения при наличии полупроводниковых преобразователей / А.Е. Козярук, Н.М. Кузнецов, О.В. Федоров и др. // Горное оборудование и электромеханика. – 2011. – № 6. – С. 30–35.

49. Исследование воздействия активных выпрямителей большой мощности на питающую сеть / Т.Р. Храмшин, Г.Л. Корнилов, А.А. Николаев и др. // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2013. – № 1. – С. 80–83.

50. Экспериментальные исследования электромагнитной совместимости современных электроприводов в системе электроснабжения металлургического предприятия / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, Т.Р. Храмшин и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2016. – Т.14, № 4. – С. 96–105.

51. Плащанский, Л.А. Основы электроснабжения горных предприятий: учебник для высших учебных заведений / Л.А. Плащанский. – М.: Изд-во МГГУ, 2006. – 499 с.

52. Плащанский, Л.А. Компенсация реактивной мощности в распределительных сетях горных предприятий / Л.А. Плащанский, М.М. Холмогоров // Горные науки и технологии. – 2016. – № 1. – С. 20–24.

53. Плащанский, Л.А. Влияние высших гармоник на состояние электрических сетей Навоийского горно-металлургического комбината / Л.А. Плащанский, Ш.У. Зарипов // Горный журнал. – 2010. – № 2. – С. 70–73.

54. Плащанский, Л.А. Оценка показателей качества напряжения в условиях горных предприятий / Л.А. Плащанский, Ш.У. Зарипов. – М.: Изд-во МГГУ, 2011. – 14 с.

55. Розанов, Ю.К. Современные методы улучшения качества электроэнергии (аналитический обзор) / Ю.К. Розанов, М.В. Рябчицкий // Электротехни-

ка. – 1998. – № 3. – С. 10–17.

56. Розанов, Ю.К. Силовая электроника: учебник для вузов / Ю.К. Розанов, М.В. Рябчицкий, А.А. Кваснюк. – 2-е изд., стер. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009. – 632 с.

57. Розанов, Ю.К. Гибридные фильтры для снижения несинусоидальности тока и напряжения в системах электроснабжения / Ю.К. Розанов, Р.П. Гринберг // Электротехника. – 2006. – № 10. – С. 55–60.

58. Розанов, Ю.К. Современные методы регулирования качества электроэнергии средствами силовой электроники / Ю.К. Розанов, М.В. Рябчицкий, А.А. Кваснюк // Электротехника. – 1999. – № 4. – С. 28–32.

59. Техничко-экономическое обоснование внедрения системы непрерывного мониторинга показателей качества электроэнергии на объектах горных предприятий / О.В. Федоров, А.С. Семёнов, А.Н. Егоров и др. // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2016. – № 9–10. – С. 91–97.

60. Семёнов, А.С. Разработка системы мониторинга для измерения показателей качества электроэнергии на горных предприятиях / А.С. Семёнов, Н.М. Кузнецов // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 4–2. – С. 295–299.

61. Семёнов А.С. Определение нелинейных нагрузок в системе электроснабжения подземного рудника / А.С. Семенов // Современные наукоемкие технологии. – 2016. № 9-3. – С. 445–451.

62. Семёнов, А.С. Моделирование режимов работы систем электроснабжения горных предприятий: монография / А.С. Семёнов, В.М. Хубиева, Н.Н. Кугушева. – М.: «Перо», 2015. – 100 с.

63. Семёнов, А.С. Моделирование режимов работы электроприводов горного оборудования: монография / А.С. Семёнов, Н.Н. Кугушева, В.М. Хубиева. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 112 с.

64. Semenov, A.S. An analysis of the results of monitoring the quality of electric power in an underground mine / A.S. Semenov, N.M. Kuznetsov // Measurement Techniques. – 2014. – С. 417-420.

65. Semenov, A.S. Development of monitoring system for measuring the quality of electrical energy on the mining industry / A.S. Semenov // Applied and Fundamen-

tal Studies. Proceedings of the 1st International Academic Conference. Edited by Yan Maximov. – 2012. – С. 301–304.

66. Смирнов, С.С. Высшие гармоники в сетях высокого напряжения / С.С. Смирнов. – Новосибирск: Наука, 2010. – 327 с.

67. Смирнов, С.С. Нормализация уровней напряжений высших гармоник в сетях высокого напряжения / С.С. Смирнов, Л.И. Коверникова // Электричество. – 2000. – № 11. – С. 25–30.

68. Тульский, В.Н. Управление качеством электроэнергии и надежностью электроснабжения / И.И. Карташев, Д.С. Подольский, В.Н. Тульский // Энерго-эксперт. – 2012. – № 3. – С. 82–84.

69. Подходы к обеспечению нормативного качества электроэнергии / О.В. Большаков, В.В. Воронин, Р.Г. Шамонов и др. // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2014. – № 1. – С. 48–51.

70. Тульский, В.Н. Метод анализа высших гармоник напряжения в магистральной электрической сети / В.Н. Тульский, А.С. Салимова, Р.Г. Шамонов // Электричество. – 2014. – № 7. – С. 26–33.

71. Управление качеством электроэнергии в электрических сетях / В.Н. Тульский, И.И. Карташев, М.Г. Симуткин и др. / Горный журнал. – 2012. – № 12. – С. 52–55.

72. Тульский, В.Н. Мониторинг как инструмент в задачах управления качеством электроэнергии / В.Н. Тульский, Ю.В. Шаров, И.И. Карташев // Вестник Московского энергетического института. – 2015. – № 2. – С. 67–71.

73. Проблемы оценки вклада потребителя в искажение качества электроэнергии / Д.В. Дворкин, М.А. Силаев, В.Н. Тульский и др. // Электричество. – 2017. – № 7. – С. 12–19.

74. Study and analysis of power quality for an electric power distribution system – Case study / V.N. Tulskey, A.S. Vanin, A. Tolba Mohamed, A.A. Zaki Diab // Moscow region, IEEE NW, Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Con. (EIConRusNW). – 2016. – P. 710 – 716.

75. Arrillaga, J. Power systems harmonics / J. Arrillaga, N. R. Watson. – 2nd ed. – Chichester: John Wiley & Sons, 2003. – 412 p.

76. Akagi, H. Modern active filters and traditional passive filters / H. Akagi // Bulletin of The Polish Academy of Sciences Technical Sciences. – 2006. – Vol. 54, N 3. – P. 255–269.
77. Akagi, H. Active harmonic filters / H. Akagi // Proceedings of the IEEE. – 2005. – Vol. 93, N 12. – P. 2128–2141.
78. Bhattacharya, S. Hybrid solutions for improving passive filter performance in high power applications / S. Bhattacharya, P. Cheng, D. Divan // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1997. – Vol. 33, N 3. – P. 732–747.
79. Parallel active filter system implementation and design issues for utility interface of adjustable speed drive systems / S. Bhattacharya [et al.] // Industry Applications Conference, 1996. Thirty-First IAS Annual Meeting, IAS '96., Conference Record of the 1996 IEEE (San Diego, 6-10 Oct. 1996). – 1996. – Vol. 2. – P. 1032–1039.
80. Baggini, A. Electrical energy efficiency: technologies and applications / A. Baggini, A. Sumper. – Chichester : John Wiley & Sons, 2012. – 434 p.
81. Baggini, A. Handbook of power quality / A. Baggini. – Chichester : John Wiley & Sons, 2008. – 642 p.
82. Optimal planning of large passive-harmonic-filters set at high voltage level / C.J. Chou, C.W. Liu, J.Y. Lee, K.D. Lee // IEEE Transactions on Power Systems. – 2000. – Vol. 15, N 1. – P. 433–441.
83. Cho, Y. Single-tuned passive harmonic filter design considering variances of tuning and quality factor / Young-Sik Cho, Hanju Cha // Journal of International Council on Electrical Engineering. – 2011. – Vol. 1, N 1. – P. 7–13.
84. Das, J. C. Power System Harmonics and Passive Filter Designs / J. C. Das. – Hoboken : John Wiley & Sons, 2015. – 873 p.
85. Fujita, H. A practical approach to harmonic compensation in power systems series connection of passive and active filters / H. Fujita, H. Akagi // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1991. – Vol. 27, N 6. – P. 1020–1025.
86. Актуальность исследования параметров качества электрической энергии в подземных сетях угольных шахт / С.Н. Решетняк, К.Н. Копылов, Л.А. Плащанский и др. // Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых: Материалы 13-й Международной научной школы молодых ученых и специалистов.

Москва, – 2016. – С. 129–134.

87. Решетняк, С.Н. Особенности применения преобразовательной техники на горнодобывающих предприятиях России / С.Н. Решетняк, В.Н. Фащиленко, О.В. Федоров // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – № 6. – С. 331–334.

88. Использование виртуального моделирования для выбора и проверки средств компенсации реактивной мощности и фильтрации гармоник в системах электроснабжения горнодобывающих предприятий / Массов А.А., Плотников С.В., Кирилина О.И. и др. // Разработка и внедрение ресурсо- и энергосберегающих технологий и устройств. Сборник статей VI Международной научно-практической конференции. Пенза, – 2015. – С. 12–25.

89. Моделирование характерного узла нагрузки высоковольтной сети рудников Норильского промышленного района / С.В. Плотников, А.А. Массов, О.И. Кирилина и др. // Молодежная наука в XXI веке: традиции, инновации, векторы развития. Материалы Международной научно-исследовательской конференции молодых ученых, аспирантов, студентов и старшеклассников: в 3 ч. Самара–Оренбург, – 2017. – С. 296–299.

90. Массов, А.А. Создание имитационной модели для выявления искажений форм кривых токов и напряжений в сетях рудников / А.А. Массов, П.М. Козлов // Промышленная энергетика. – 2011. – № 5. – С. 44–49.

91. Использование имитационного моделирования для выбора и проверки фильтрокомпенсирующих устройств скиповой подъемной установки / О.И. Кирилина, А.А. Массов, С.В. Плотников и др. // Промышленная энергетика. – 2016. – №11. – С. 51–56.

92. Файбисович, Д.Л. Справочник по проектированию электрических сетей // Д.Л. Файбисович, И.Г. Карапетян, И.М. Шапиро; под ред. Д.Л. Файбисовича. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: ЭНАС, 2012. – 376 с.

93. Комплектные тиристорные электроприводы: справ. // И.Х. Евзеров, А.С. Горобец, Б.И. Мошкович [и др.]; под ред. В.М. Перельмутера. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 319 с.

94. Лукутин, Б.В. Силовые преобразователи в электроснабжении: учеб.

пособие / Б.В. Лукутин, С.Г. Обухов, И.А. Плотников. – Томск: Изд-во ТПУ, 2014. – 150 с.

95. Гельман, М.В. Преобразовательная техника: учеб. пособие / М.В. Гельман, М.М. Дудкин, К.А. Преображенский. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – 425 с.

96. Иванов, В.С. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий / В.С. Иванов, В.И. Соколов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 336 с.

97. ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. 2014–07–01. – М.: Стандартинформ, 2014. – 36 с.

98. Оценка дополнительных потерь мощности от снижения качества электрической энергии в элементах системы электроснабжения / С.Ю. Долингер, А.Г. Люতারевич, В.Н. Горюнов и др. // Омский научный вестник. – 2013. – № 2. – С. 178–183.

99. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации: утв. Минэнерго России 19.06.03: вводятся с 1 октября 2003 года / Российская Федерация. М-во энергетики. – СПб.: ДЕАН, 2003. – 336 с.

100. IEEE 519-2014. IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Systems. – IEEE, 2014. – 112 с.

101. Селезнев, А.С. Снижение уровня высших гармоник в электрических сетях высокого напряжения / А.С. Селезнев // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2014. – № 4 (87). – С. 143–148.

102. Силовые гибридные фильтры для улучшения электромагнитной обстановки в промышленных сетях / А. Буре [и др.] // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2008. – № 9. – С. 18–26.

103. Идельчик, В.И. Электрические системы и сети: учебник для вузов / В.И. Идельчик. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 592 с.

104. Приборы для измерений электроэнергетических величин и показателей качества электрической энергии. Энергомонитор–3.3Т1. Руководство по экс-

плуатации: каталог. – ред. 9. – СПб: НПП «Марс–Энерго», 2016. – 120 с.

105. Трехфазный анализатор параметров электросетей, качества и количества электроэнергии C.A 8335 QUALISTAR PLUS. Руководство пользователя: каталог. – «CHAUVIN ARNOUX», 2008. – 72 с.

106. ГОСТ 30804.4.7–2013 (IEC 61000-4-7:2009). Совместимость технических средств электромагнитная. Общее руководство по средствам измерений и измерениям гармоник и интергармоник для систем электроснабжения и подключенным к ним техническим средств. – М.: Стандартинформ, 2013.

107. Авербух, М.А. О потерях электроэнергии в системах электроснабжения индивидуального жилищного строительства / М.А. Авербух, Е.В. Жилин // Энергетик. – 2016. – № 6. – С. 54–57.

108. Авербух, М.А. Оценка высших гармоник в сетях с частотным крановым электроприводом / М.А. Авербух, Д.С. Лимаров, Д.Н. Коржов // Энергетик. – 2015. – № 5. – С. 31–34.

109. Авербух, М.А. Экспериментальное исследование несинусоидальных режимов цеховой системы электроснабжения при динамическом вибрационном формировании бетонных смесей / М.А. Авербух, Д.А. Прасол, С.В. Хворостенко // Электротехнические системы и комплексы. – 2017. – № 1(34). – С.24–30.

110. ГОСТ Р 8.736–2011. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. – М.: Стандартинформ, 2013.

111. Черных, И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И.В. Черных. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.

112. Герман-Галкин, С.Г. MatLab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК / С.Г. Герман-Галкин. – СПб.: Питер, 2008. – 368 с.

113. Технический отчет по результатам годовой ревизии, наладки и испытаний шахтной подъемной машины 1-5-5,6/0,8 ООО «Металл-групп». Ствол № 1. Скиповая подъемная установка № ЗПУ/2011 / Башуев В.А. [и др.]. – Екатеринбург: ЗАО СМНУ Цветметналадка, 2011. – 49 с.

114. Технический отчет по результатам годовой ревизии, наладки и испы-

таний шахтной подъемной машины 1-5-5,6/0,8 ООО «Металл-групп». Ствол № 1. Клетевая подъемная установка № 2ПУ/2011 / Башуев В.А. [и др.]. – Екатеринбург: ЗАО СМНУ Цветметналадка, 2011. – 51 с.

115. Попков, О.З. Основы преобразовательной техники: учеб. пособие для вузов / О.З. Попков. – 3-е изд., стер. – М.: Издательский дом МЭИ, 2010. – 200 с.

116. Закладной, А.Н. Энергосбережение средствами промышленного электропривода / А.Н. Закладной, А.В. Праховник, А.И. Соловей – Киев: ДИЯ, 2001. – 343 с.

117. Третьяков, Е.А. Управление качеством электрической энергии в распределительных сетях железных дорог: монография / Е.А. Третьяков. – Омск: Омский гос. ун-т путей сообщения, 2013. – 196 с.

118. Жежеленко, И.В. Методы вероятностного моделирования в расчетах характеристик электрических нагрузок потребителей / И.В. Жежеленко. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 234 с.

119. Веников, В.А. Электрические системы. Математические задачи электроэнергетики / В.А. Веников. – М.: Высшая школа, 1981. – 288 с.

120. Андерсон, Т. Статистический анализ временных рядов / Т. Андерсон. М.: Мир, 1976. – 288 с.

121. Бернас, С. Математические модели элементов электроэнергетических систем: пер. с польского / С. Бернас, З. Цек. – М.: Энергоиздат, 1982. – 346 с.

122. Карташев, И.И. Качество электроэнергии в системах электроснабжения. Способы его контроля и обеспечения / И.И. Карташев; под ред. М.А. Калугиной. – М.: МЭИ, 2000. – 120 с.

123. Белецкий, А.Ф. Теория линейных электрических цепей: учебник для вузов / А.Ф. Белецкий. – М.: Радио и связь, 1986. – 544 с.

124. Гиллемин, Э.А. Синтез пассивных цепей / Э.А. Гиллемин; пер. с англ. под ред. М.М. Айзинова. – М.: Связь, 1970. – 720 с.

125. Приказ Министерства энергетики Российской Федерации от 23.06.2015 № 380. «О порядке расчета значений соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств) потребителей электрической энергии»

[Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/420285270/>.
Дата обращения: 21.08.2018.

126. Чистяков, Г.Н. Применение нечеткой логики при оптимизации компенсации реактивных нагрузок / Г.Н. Чистяков, Р.Ю. Беляев // *Электрика*. – 2006. – № 12. – С. 20–24.

127. Гашимов, А.М. Улучшенный алгоритм нечеткой логики для управления реактивной мощностью и напряжением в распределительных сетях / А.М. Гашимов, Г.Б. Гулиев, Н.Р. Рахманов // *Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика*. – 2014. – № 2. – С. 29–39.

128. Синтез алгоритма управления шунтирующими реакторами с использованием нечеткой логики / Э.С. Пирвердиев, А.М. Гашимов, Г.Б. Гулиев и др. // *Электричество*. – 2018. – № 6. – С. 35–40.

129. Кофман, А. Введение в теорию нечетких множеств: пер. с франц. / А. Кофман. – М.: Радио и связь, 1982. – 432 с.

130. Гафт, М.Г. Принятие решений при многих критериях / М.Г. Гафт. – М.: Знание, 1979. – 64 с.

131. Кини, Р.Л. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения / Р.Л. Кини, Х. Райфа. – М.: Радио и связь, 1981. – 560 с.

132. Борисов, А.Н. Принятие решений на основе нечетких моделей: примеры использования / А.Н. Борисов, О.А. Крумберг, И.П. Федоров: Риж. техн. ун-т. – Рига: Зинатне, 1990. – 184 с.

133. Третьяков, Е.А. Оптимизация качества и потерь электрической энергии в электрических сетях нетяговых потребителей / Е.А. Третьяков // *Транспорт Российской Федерации: журнал о науке, практике, экономике*. – 2011. – № 3 (34). – С. 50–54.

134. Авербух, М.А. Минимизация потерь мощности при несинусоидальных режимах в высоковольтных рудничных сетях / М.А. Авербух, А.В. Погорелов, Д.А. Прасол // *Промышленная энергетика*. – 2018. – № 7. – С. 38–46.

135. Саати, Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Саати. – М.: Радио и связь, 1993. – 278 с.

136. Никул, Е.С. Алгоритм анализа матриц парных сравнений с помощью

вычисления векторов приоритетов / Е.С. Никул // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 2 (127). – С. 241–247.

137. Евсеев, М.Ю. Оценка эффективности инвестиционных проектов / М.Ю. Евсеев, В.Н. Тишина // Динамика взаимоотношений различных областей науки в современных условиях. – 2017. – С. 115–119.

138. Конденсаторные установки компенсации реактивной мощности [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://energozapad.ru/kompensatory-reaktivnoymoschnosti-1.html>. Дата обращения: 12.05.2018.

139. Лимаров, Д.С. Электромагнитная совместимость в цеховых системах электроснабжения при наличии электроприемников с нелинейными вольтамперными характеристиками: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Лимаров Денис Сергеевич. – Белгород, 2015. – 189 с.

140. Коржов, Д.Н. Обеспечение электромагнитной совместимости в системах электроснабжения промышленных предприятий с электроустановками индукционного нагрева: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Коржов Дмитрий Николаевич. – Белгород, 2015. – 169 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ РУДНИЧНОЙ СЕТИ


 Утверждаю
 Главный энергетик
 ООО «Металл-Групп»
 Глотов Ю.П.
 22.08.2016

Программа измерений электрических параметров РУ-6 кВ «ЗПМ. Ствола №1»

Проблема влияния рудничного электрооборудования обусловлена возрастающим влиянием высших гармонических составляющих тока на работу электрической сети и систем электроснабжения потребителей. Присутствие высших гармоник тока в электрических сетях приводит к резким скачкам напряжения в узлах нагрузки выше допустимого значения, выходу из строя технического оборудования, дополнительной нагрузке сети, ускоренному старению оборудования

1. Цель проведения измерений.

Целью проведения эксперимента является определение в течение некоторого промежутка времени значений следующих электрических параметров на стороне высшего напряжения трансформаторной подстанции РП-6 кВ здания подъемных машин, обеспечивающей электроснабжение приводов Клетевой и Скиповой ПУ:

1.1. U_1 – значение (действующее) основной гармонической составляющей напряжения, В, кВ.

1.2. I – действующее значение тока, А, кА.

1.3. φ – фазовый угол между напряжением и током основной гармонической составляющей, град..

1.4. P – активная электрическая мощность, Вт, кВт.

1.5. Q – реактивная электрическая мощность, вар, квар.

1.6. K_U – суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения, %;

1.7. $K_{U(n)}$ – коэффициент n-ой гармонической составляющей напряжения, % U_I .

1.8. K_I – суммарный коэффициент гармонических составляющих тока, %.

1.9. $K_{I(n)}$ – коэффициент n-ой гармонической составляющей тока, %.

1.10. P_n и Q_n – активная и реактивная электрическая мощность n-ой гармоники, кВт и квар.

1.11. n – номер гармонической составляющей напряжения.

Значения перечисленных электрических параметров необходимы для оценки показателей качества электрической энергии и показателей электромагнитной совместимости в рудничных высоковольтных сетях.

2. Место проведения экспериментов.

2.1. Электрические параметры для оценки показателей качества и электромагнитной совместимости определяются на высокой стороне РУ-6 кВ «ЗПМ. Ствола №1» на основных вводных кабельных линиях (вводные ячейки «2» и «11») при помощи прибора «Энергомонитор - 3.3Т1» и анализатора параметров электросетей С.А.8335 (рисунок 1).

Прибор «Энергомонитор - 3.3Т1», заводской номер № 2202 является утвержденным Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии типом средств измерений в (регистрационный номер № 39952-08). Интервал между поверками – 2 года. Прибор «Энергомонитор - 3.3Т1» имеет свидетельство о поверке № 008014 от «28» апреля 2016 года. Организация, выполнившая поверку – «ФБУ Белгородский ЦСМ».

Прибор анализатора параметров электросетей С.А.8335, заводской номер № 00213260 является утвержденным Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии типом средств измерений в (регистрационный номер № 28710-09). Прибор анализатора параметров электросетей С.А.8335 имеет свидетельство о поверке № 008013 от «28» апреля 2016 года. Организация, выполнившая поверку – «ФБУ Белгородский ЦСМ».

Копии свидетельств о проверке и свидетельства об утверждении средств измерений представлены в приложении.

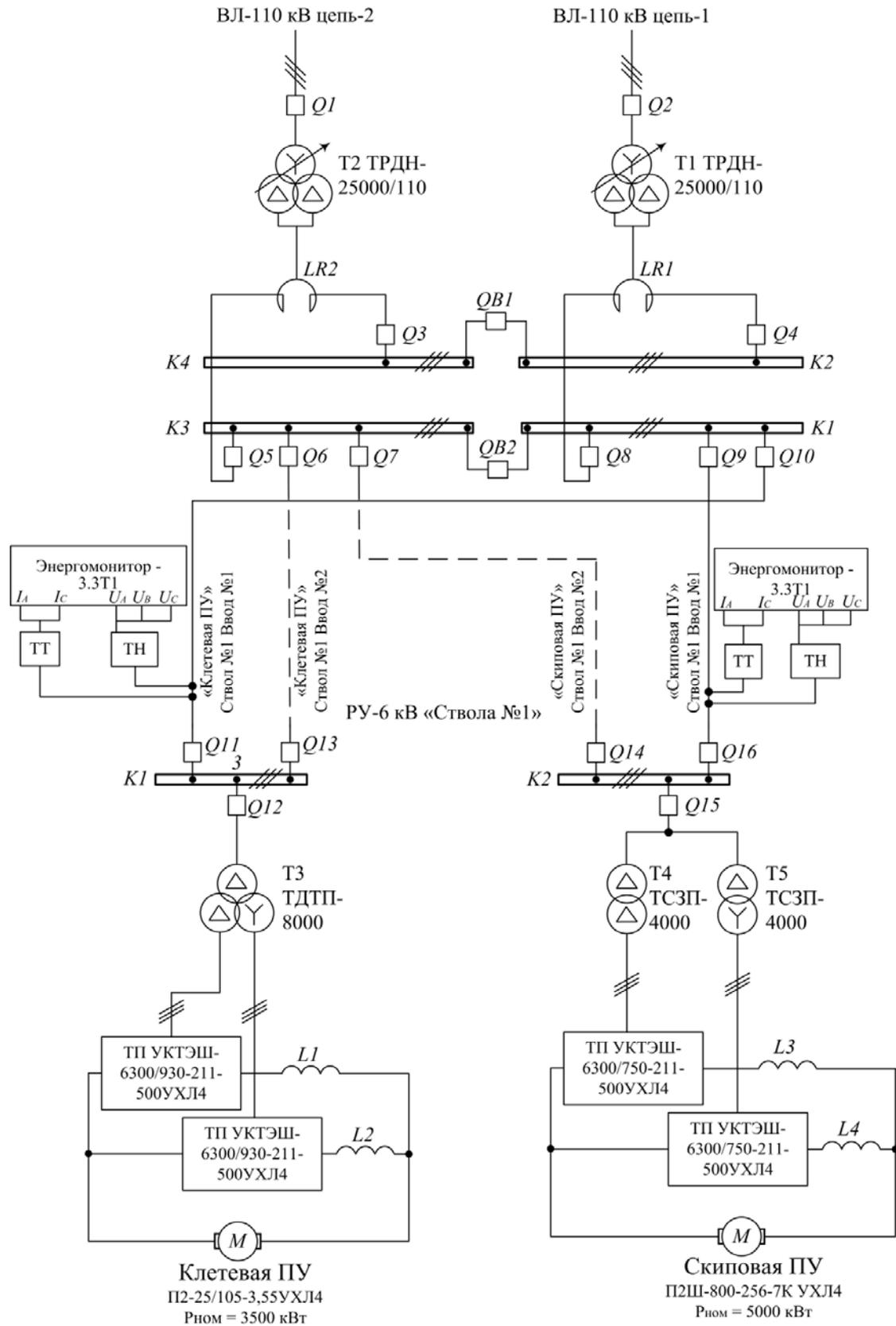


Рисунок 1. Схема РУ-6 кВ «ЗПМ. Ствола №1» и мест подключения приборов «Энергомонитор 3.3Т1» и С.А 8335

2.2. Подключение приборов осуществляется к трехфазной трехпроводной сети с помощью токоизмерительных клещей и прижимных контактов.

2.3. Показания необходимо снимать со вторичных цепей трансформаторов тока и трансформаторов напряжения РУ-6 кВ «ЗПМ. Ствола №1».

3. Подготовительные работы.

3.1. Утвердить программу проведения измерений и обеспечить безопасность их проведения в помещении РУ-6 кВ «ЗПМ. Ствола №1».

3.2. Подготовить оборудование и приборы, предназначенные для проведения измерений.

4. Порядок проведения измерений электрических параметров для оценки показателей качества и показателей электромагнитной совместимости на высокой стороне РУ-6 кВ «ЗПМ. Ствола №1».

4.1. Подключить питание и измерительные кабели к прибору «Энергомонитор – 3.3Т1» и к прибору С.А.8335.

4.2. Обесточить первичные обмотки измерительных трансформаторов тока ТА1 – ТА3.

4.3. Выставить необходимые параметры регистрации и пределы измерений тока и напряжения на приборе «Энергомонитор – 3.3Т1» и приборе С.А.8335.

4.4. Подключить токоизмерительные клещи и входы по напряжению к выводам вторичных обмоток измерительных трансформаторов.

4.5. Подключить первичные обмотки измерительных трансформаторов.

4.6. Активировать режим регистрации параметров электрической сети (ток, напряжение, мощность), измерения параметров проводить в течение 3 (трёх) суток. Выполнить проверку регистрации электрических параметров через 1 (один) час после установки прибора и через одни сутки.

4.7. По окончании времени регистрации обесточить первичные обмотки измерительных трансформаторов и отсоединить приборы от вторичных обмоток.

Примечание: вышеуказанные измерения следует провести при работе электродвигателей клетевой и скиповой ПУ.

В таблицах 1 и 2 приведены характеристики приборов, необходимых для выполнения измерений.

Таблица 1 – Характеристики прибора «Энергомонитор 3.3Т1»

| Наименование | Погрешность измерения | Предел измерения |
|--|---|------------------|
| Ток, А | $\pm (1 + 0,05 \cdot (\frac{5}{I} - 1))$, %* | 7,5 |
| Напряжение, В | $\pm (0,1 + 0,01 \cdot (\frac{415}{U} - 1))$, %* | 622,5 |
| Фазовый угол, градус | $\pm 0,5$ | 360 |
| Активная мощность, Вт | $\pm (2 + 0,1 \cdot (\frac{2075}{P} - 1))$, %* | 3735 |
| Реактивная мощность, вар | ± 4 % | 3735 |
| Коэффициент n-ой гармонической составляющей напряжения ($K_{U(n)}$), % | ± 5 % | 49,9 |
| Коэффициент n-ой гармонической составляющей тока ($K_{I(n)}$), % | ± 10 % | 49,9 |
| Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения (K_U), % | ± 5 % | 49,9 |
| Активная электрическая мощность n-ой гармоники, (P_n), Вт | ± 10 % | 207,5 |
| Суммарный коэффициент гармонических составляющих тока (K_I), % | ± 10 % | 49,9 |

В формулах, отмеченных знаком *, используются следующие величины: I – измеренное значение тока, U – измеренное значение напряжения, P – измеренное значение мощности.

Таблица 2 – Характеристики прибора С.А.8335

| Измеряемые величины | Диапазоны измерений | Пределы допускаемых основных погрешностей |
|---|------------------------|---|
| Напряжение постоянного и переменного тока, В Фазовое Линейное | 10...1000 10...1000 | $\pm 0,8 \% + 1 \text{ В}$ |
| Коэффициент амплитуды (пик-фактор) | 1...3,99 4...9,99 | $\pm 1 \% + 2 \text{ е.м.р.}$ $\pm 5 \% + 2 \text{ е.м.р.}$ |
| Сила переменного тока, А | 10...6500 | $\pm 0,5 \% + 1 \text{ А}$ |
| Сила переменного тока, пиковое значение, А | 10...9190 | $\pm (1 \% + 1 \text{ А})$ |
| Сила постоянного тока, А (с клещами серии РАС) | 1...1200 | $\pm 1 \% + 1 \text{ А}$ |
| Частота, Гц | 40...69 | $\pm 1 \text{ е.м.р.}$ |
| Активная мощность, кВт·А | 0...9999 | $\pm 1,5 \% + 10 \text{ е.м.р.}$ ($0,5 \leq \cos \varphi \leq 0,8$) |
| Реактивная мощность, кВт·А | 0...9999 | $\pm 2,5 \% + 20 \text{ е.м.р.}$ ($0,2 \leq \cos \varphi \leq 0,5$) |
| Полная мощность, кВт·А | 0...9999 | $\pm 1 \% + 10 \text{ е.м.р.}$ |
| Коэффициент мощности | -1...1 | $\pm 1,5 \% (\cos \varphi \geq 0,5)$ $\pm 1,5 \% + 2 \text{ е.м.р.}$ ($0,2 \leq \cos \varphi \leq 0,5$) |
| Активная энергия, МВ·Ач | 0...9999 | $\pm 1,5 \% + 10 \text{ е.м.р.}$ ($0,5 \leq \cos \varphi \leq 0,8$) |
| Реактивная энергия, МВ·Ач | 0...9999 | $\pm 2,5 \% + 20 \text{ е.м.р.}$ ($0,2 \leq \cos \varphi \leq 0,5$) |
| Полная энергия, МВ·Ач | 0...9999 | $\pm 1 \% + 10 \text{ е.м.р.}$ |
| Коэффициент гармоник, % | 0...999,9 | $\pm 1 \% + 5 \text{ е.м.р.}$ |
| Коэффициент нелинейных искажений, % | 0...999,9 | $\pm 1 \% + 10 \text{ е.м.р.}$ |

Согласовано:

Начальник подъема ООО «Металл-груп» _____

Дробязко А.А.

Программу составил:

аспирант кафедры «Электроэнергетика
и автоматика» БГТУ им. В.Г. Шухова

Прасол Д.А.

Программу проверил:

Научный руководитель, д.т.н., профессор кафедры
«Электроэнергетика и автоматика» БГТУ им. В.Г. Шухова,

Авербух М.А.



ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО
ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

об утверждении типа средств измерений

RU.C.34.001.A № 34446

Срок действия до **28 ноября 2018 г.**

НАИМЕНОВАНИЕ ТИПА СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

Приборы для измерения электроэнергетических величин и показателей качества электрической энергии "Энергомонитор-3.3Т1"

ИЗГОТОВИТЕЛЬ

ООО "НПП Марс-Энерго", г.Санкт-Петербург

РЕГИСТРАЦИОННЫЙ № **39952-08**

ДОКУМЕНТ НА ПОВЕРКУ

МС3.055.028 МП

ИНТЕРВАЛ МЕЖДУ ПОВЕРКАМИ **2 года**

Свидетельство об утверждении типа продлено приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от **28 ноября 2013 г. № 1387**

Описание типа средств измерений является обязательным приложением к настоящему свидетельству.

Заместитель Руководителя
Федерального агентства



Ф.В.Булыгин

"09" 12 2013 г.

Серия СИ

№ **012790**

Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии
Федеральное бюджетное учреждение
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РЕГИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР
СТАНДАРТИЗАЦИИ, МЕТРОЛОГИИ И ИСПЫТАНИЙ В БЕЛГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ»
(ФБУ «Белгородский ЦСМ»)
 308007, г. Белгород, ул. Садовая, 110, тел.: (4722) 201-333, e-mail: info@csm-belgorod.ru

Аттестат аккредитации №RA.RU.311380
СВИДЕТЕЛЬСТВО О ПОВЕРКЕ
 № **008014**

Действительно до
 28 апреля 2018 г.

Средство измерений **Прибор для измерения электроэнергетических величин и ПКЭ
 Энергомонитор-3.3Т1, регистрационный №39952-08**

наименование, тип, модификация, регистрационный номер в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений

если в состав средства измерений входят несколько автономных измерительных блоков, то приводить их перечень и заводские номера

отсутствует

серия и номер клейма предыдущей поверки (если такие серия и номер имеются)

Заводской номер (номера) **2202**

поверено:

наименование величин, диапазонов, на которых поверено средство измерений (если предусмотрено методикой поверки)

поверено в соответствии с:

МС3.055.028 МП Прибор для измерения электроэнергетических величин и показателей качества электрической энергии "Энергомонитор - 3.3Т1"

наименование и обозначение документа, на основании которого выполнена поверка

с применением эталонов единиц величин:

Установка поверочная универсальная УППУ-МЭ 3.1К №277 3.1.ЗБД.0419.2014 Калибратор универсальный Fluke 9100E №151861746 3.1.ЗБД.0365.2013 Прибор сравнения КНТ-05 №58-11 Трансформатор тока эталонный двухступенчатый ИТТ-3000.5 №265-11 3.1.ЗБД.0125.2012 Частотомер универсальный CNT-90 №245955 3.1.ЗБД.0417.2014 Генератор сигналов сложной формы со сверхнизким уровнем искажений DS360

наименование, тип, заводской номер, регистрационный номер (при наличии), разряд, класс или погрешность эталона, применяемого при поверке

при следующих значениях влияющих факторов:

Температура: 20,5 °С; Относительная влажность: 47,5 %; Атмосферное давление: 990,9 гПа.

приводят перечень влияющих факторов, нормированных в документе на методику поверки, с указанием их значений

и на основании результатов периодической поверки признано соответствующим установленным в описании типа метрологическим требованиям и пригодным к применению в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений.

Знак поверки

Начальник отдела

Поверитель

Аникин С.В.

Байдалинов Д.И.

28 апреля 2016 г.

№ 008014



Подлежит опубликованию
в открытой печати



СОГЛАСОВАНО"
Руководитель ЦИ СИ ФГ УП «ВНИИМС»

В.Н. Яншин

25 октября 2009 г.

| | |
|---|--|
| Измерители показателей качества электрической энергии С.А 8220, С.А 8230, С.А 8332, С.А 8334, С.А 8335 и С.А 8352 | Внесены в Государственный реестр средств измерений. Регистрационный № 28710-09 Взамен № 28710-07 |
|---|--|

Выпускаются по технической документации фирмы «CHAUVIN-ARNOUX», Франция

НАЗНАЧЕНИЕ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

Измерители показателей качества электрической энергии С.А 8220, С.А 8230, С.А 8332, С.А 8334, С.А 8335 и С.А 8352 предназначены:

- для измерения напряжения, силы, частоты, разности фаз и быстрого преобразования Фурье сигналов переменного тока в электрических сетях систем электроснабжения общего назначения переменного трехфазного и однофазного тока номинальной частоты 50 Гц.
- вычислении по этим результатам мощности и качества электрической энергии.

Основная область применения: измерение режимов работы и показателей качества электрической энергии промышленных и административных зданий.

ОПИСАНИЕ

Принцип действия измерителей показателей качества электрической энергии С.А 8220, С.А 8230, С.А 8332, С.А 8334, С.А 8335 и С.А 8352, включает аналого-цифровое преобразование входных сигналов силы тока и напряжения переменного трехфазного (трех и четырех проводных сетей) или однофазного тока, их цифровую обработку, включая быстрое преобразование Фурье, и представление в режиме цифрового осциллографа.

Измеряемые величины:

Напряжение переменного тока - истинные среднеквадратические и пиковые значения
Сила переменного тока - истинные среднеквадратические и пиковые значения
Частота
Разность фаз

Вычисляемые величины:

Активная, реактивная и полная мощность отдельной фазы и всех фаз
Коэффициент мощности
Активная, реактивная, полученная и переданная энергия; полная энергия
Напряжение, ток и мощность гармоник до 50 порядка
Коэффициент трансформации тока
Флуктуации напряжения
Разбаланс фаз

Однофазный малогабаритный измеритель С.А 8230 предназначен для мониторинга состояния электроустановок в однофазных и симметричных 3-фазных цепях, особенно в использующих силовую электронику.

Позволяет измерять: напряжение, силу и частоту переменного тока, полную, активную и реактивную мощность, коэффициент гармоник, сдвиг фаз и имеет прямой доступ к различным функциям. Тип подключаемого к входу прибора измерительного преобразователя определяется автоматически.

Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии
Федеральное бюджетное учреждение
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РЕГИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР
СТАНДАРТИЗАЦИИ, МЕТРОЛОГИИ И ИСПЫТАНИЙ В БЕЛГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ»
(ФБУ «Белгородский ЦСМ»)
 308007, г. Белгород, ул. Садовая, 110, тел.: (4722) 201-333, e-mail: info@csm-belgorod.ru

Аттестат аккредитации № RA.RU.311380
СВИДЕТЕЛЬСТВО О ПОВЕРКЕ
 № 008013

Действительно до
 28 апреля 2018 г.

Средство измерений **Измеритель показателей качества электрической энергии С.А 8335,**
регистрационный №28710-09

наименование, тип, модификация, регистрационный номер в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений

если в состав средства измерений входят несколько автономных измерительных блоков, то приводят их перечень и заводские номера

отсутствует

серия и номер клейма предыдущей поверки (если такие серия и номер имеются)

Заводской номер (номера)

00213260

поверено:

наименование величин, диапазонов, на которых поверено средство измерений (если предусмотрено методикой поверки)

поверено в соответствии с:

МП 28710-09 Измерители показателей качества электрической энергии С.А 8220, С.А 8230, С.А 8332, С.А 8334 и С.А 8352. Методика поверки.

наименование и обозначение документа, на основании которого выполнена поверка

с применением эталонов единиц величин:

Установка поверочная универсальная УППУ-МЭ 3.1К №277 3.1.ЗБД.0419.2014

наименование, тип, заводской номер, регистрационный номер (при наличии), разряд, класс или погрешность эталона, применяемого при поверке

при следующих значениях влияющих факторов:

Температура: 20,5 °С; Относительная влажность: 47,5 %; Атмосферное давление: 990,9 гПа.

приводят перечень влияющих факторов, нормированных в документе на методику поверки, с указанием их значений

и на основании результатов периодической поверки признано соответствующим установленным в описании типа метрологическим требованиям и пригодным к применению в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений.

Знак поверки

Начальник отдела

Поверитель




Аникин С.В.

Байдалинов Д.И.

28 апреля 2016 г.

№ 008013



Протокол №1
измерений электрических параметров на вводе РУ-6 кВ «ЗПМ. Ствола №1»
скиповой ПУ

Дата проведения измерений: 23 августа 2016 года.

Место проведения измерений: ООО «Металл-Групп», РУ-6 кВ «ЗПМ. Ствола №1», вводная ячейка №11, ячейка трансформатора напряжения №13, скиповая ПУ.

Используемый прибор: «Энергомонитор - 3.3Т1», заводской номер № 2202, свидетельство о поверке № 008014 от «28» апреля 2016 года. Организация, выполнившая поверку – «ФБУ Белгородский ЦСМ».

Описание прибора, его основные технические характеристики, схема подключения приведены в программе проведения измерений. Измерения проводились с временным шагом в одну минуту.

Показания снимались со вторичных цепей трансформатора тока вводной цепи и трансформатора напряжения второй секции шин РУ-6 кВ «ЗПМ. Ствола №1». Коэффициент трансформации измерительного трансформатора тока $K_{\text{трТА}} = 800/5$, коэффициент трансформации измерительного трансформатора напряжения $K_{\text{трТВ}} = 6000/100$.

Измерения параметров проводились в течение 3 (трёх) суток (с 11:21 23.08.2016 г. по 11:21 26.08.2016 г.) с временным интервалом равным 1 (одной) минуте.

Результаты измерений.

Результаты измерений представлены в таблицах 1–7 для временного промежутка с 17:09 23.08.2016 г. по 18:49 23.08.2016 г. во время работы привода скиповой ПУ.

Таблица 1 – Действующее значение фазного тока основной частоты
и коэффициенты n-х гармонических составляющих, n = 2–10

| Время | $I_{(1)}$, А | K_n , % | $K_{I(2)}$, % | $K_{I(3)}$, % | $K_{I(4)}$, % | $K_{I(5)}$, % | $K_{I(6)}$, % | $K_{I(7)}$, % | $K_{I(8)}$, % | $K_{I(9)}$, % | $K_{I(10)}$, % |
|------------------|---------------|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 23.08.2016 17:09 | 12,99 | 12,62 | 0 | 0,8 | 0 | 9,15 | 0 | 4,77 | 0,01 | 0 | 0 |
| 23.08.2016 17:10 | 14,14 | 12,23 | 0 | 0,75 | 0,01 | 8,09 | 0 | 5,18 | 0 | 0,25 | 0 |
| 23.08.2016 17:11 | 17,34 | 10,35 | 0 | 1,1 | 0 | 3,25 | 0 | 6,87 | 0 | 1,07 | 0 |
| 23.08.2016 17:12 | 13,10 | 12,63 | 0 | 0,61 | 0 | 8,99 | 0 | 4,98 | 0 | 0,05 | 0 |
| 23.08.2016 17:13 | 12,98 | 12,73 | 0 | 0,63 | 0 | 9,26 | 0 | 4,85 | 0 | 0 | 0 |
| 23.08.2016 17:14 | 18,06 | 10,7 | 0 | 1,17 | 0 | 3,69 | 0 | 6,9 | 0 | 1,17 | 0 |
| 23.08.2016 17:15 | 286,78 | 9,14 | 0,28 | 0,44 | 0,19 | 1,94 | 0,02 | 2,08 | 0,12 | 0,46 | 0,13 |
| 23.08.2016 17:16 | 218,35 | 5,7 | 0,48 | 0,38 | 0,2 | 0,47 | 0,1 | 0,38 | 0,05 | 0,36 | 0,11 |
| 23.08.2016 17:17 | 75,41 | 8,49 | 0,89 | 1,06 | 0,43 | 5,22 | 0,54 | 2,97 | 0,16 | 0,06 | 0,04 |
| 23.08.2016 17:18 | 207,01 | 10,45 | 0,19 | 0,47 | 0,14 | 4,98 | 0,04 | 2,69 | 0,08 | 0,17 | 0,07 |
| 23.08.2016 17:19 | 259,36 | 6,79 | 0,33 | 0,45 | 0,32 | 0,45 | 0,16 | 0,41 | 0,09 | 0,35 | 0,13 |
| 23.08.2016 17:20 | 100,58 | 6,81 | 0,94 | 1,13 | 0,27 | 3,58 | 0,36 | 2,09 | 0,05 | 0,11 | 0,06 |
| 23.08.2016 17:21 | 166,94 | 10,44 | 0,14 | 0,77 | 0,1 | 5,37 | 0 | 2,8 | 0,07 | 0,13 | 0,06 |
| 23.08.2016 17:22 | 261,22 | 6,92 | 0,49 | 0,36 | 0,24 | 0,54 | 0,07 | 0,35 | 0,1 | 0,35 | 0,13 |
| 23.08.2016 17:23 | 102,11 | 6,26 | 1,14 | 1,18 | 0,37 | 3,04 | 0,4 | 1,83 | 0,1 | 0,12 | 0,09 |
| 23.08.2016 17:24 | 284,13 | 9,24 | 0,29 | 0,48 | 0,25 | 2,78 | 0,08 | 1,56 | 0,13 | 0,24 | 0,1 |
| 23.08.2016 17:25 | 238,27 | 6,31 | 0,33 | 0,5 | 0,32 | 0,47 | 0,19 | 0,44 | 0,07 | 0,34 | 0,13 |
| 23.08.2016 17:26 | 70,10 | 8,61 | 0,81 | 1,31 | 0,26 | 5,17 | 0,23 | 2,81 | 0,06 | 0,08 | 0,05 |
| 23.08.2016 17:27 | 105,38 | 10,69 | 0,09 | 0,9 | 0,21 | 6,26 | 0,14 | 3,27 | 0,03 | 0,1 | 0,03 |
| 23.08.2016 17:28 | 314,61 | 7,57 | 0,47 | 0,35 | 0,27 | 0,53 | 0,03 | 0,32 | 0,15 | 0,34 | 0,16 |
| 23.08.2016 17:29 | 125,15 | 5,66 | 1,08 | 1,09 | 0,35 | 2,21 | 0,38 | 1,43 | 0,1 | 0,18 | 0,08 |
| 23.08.2016 17:30 | 210,22 | 9,89 | 0,22 | 0,53 | 0,15 | 4,43 | 0,03 | 2,36 | 0,1 | 0,17 | 0,08 |
| 23.08.2016 17:31 | 269,52 | 7,02 | 0,3 | 0,48 | 0,35 | 0,5 | 0,16 | 0,42 | 0,09 | 0,37 | 0,13 |
| 23.08.2016 17:32 | 100,05 | 7 | 1,01 | 1,32 | 0,2 | 3,48 | 0,28 | 2,06 | 0,08 | 0,13 | 0,06 |
| 23.08.2016 17:33 | 308,51 | 8,58 | 0,37 | 0,42 | 0,24 | 1,69 | 0,06 | 0,95 | 0,14 | 0,28 | 0,13 |
| 23.08.2016 17:34 | 184,27 | 5,11 | 0,56 | 0,59 | 0,16 | 0,75 | 0,06 | 0,51 | 0,05 | 0,28 | 0,09 |
| 23.08.2016 17:35 | 64,05 | 9,38 | 0,62 | 1,05 | 0,14 | 5,97 | 0,2 | 3,23 | 0,03 | 0,06 | 0,02 |
| 23.08.2016 17:36 | 366,10 | 8,09 | 0,38 | 0,34 | 0,34 | 0,45 | 0,12 | 0,36 | 0,17 | 0,36 | 0,15 |
| 23.08.2016 17:37 | 167,52 | 4,89 | 0,56 | 0,86 | 0,22 | 0,76 | 0,16 | 0,64 | 0,08 | 0,28 | 0,08 |
| 23.08.2016 17:38 | 207,62 | 9,97 | 0,64 | 0,81 | 0,14 | 4,38 | 0,08 | 2,28 | 0,07 | 0,14 | 0,09 |
| 23.08.2016 17:39 | 254,99 | 6,72 | 0,45 | 0,39 | 0,23 | 0,55 | 0,05 | 0,36 | 0,09 | 0,37 | 0,12 |
| 23.08.2016 17:40 | 80,62 | 7,68 | 1,03 | 1,15 | 0,3 | 4,35 | 0,36 | 2,52 | 0,1 | 0,09 | 0,05 |
| 23.08.2016 17:41 | 292,78 | 9,19 | 0,31 | 0,5 | 0,25 | 2,67 | 0,07 | 1,49 | 0,12 | 0,27 | 0,1 |
| 23.08.2016 17:42 | 232,72 | 6,14 | 0,33 | 0,5 | 0,3 | 0,48 | 0,15 | 0,43 | 0,06 | 0,35 | 0,12 |
| 23.08.2016 17:43 | 62,00 | 9,06 | 0,79 | 1,25 | 0,22 | 5,61 | 0,18 | 3,06 | 0,08 | 0,08 | 0,04 |
| 23.08.2016 17:44 | 364,48 | 8,06 | 0,4 | 0,29 | 0,27 | 0,48 | 0,04 | 0,33 | 0,16 | 0,32 | 0,15 |
| 23.08.2016 17:45 | 174,54 | 5,14 | 0,57 | 0,69 | 0,22 | 0,82 | 0,1 | 0,68 | 0,07 | 0,24 | 0,09 |
| 23.08.2016 17:46 | 149,58 | 10,32 | 0,64 | 0,76 | 0,22 | 5,54 | 0,16 | 3 | 0,07 | 0,17 | 0,05 |
| 23.08.2016 17:47 | 302,16 | 7,48 | 0,34 | 0,43 | 0,37 | 0,43 | 0,17 | 0,41 | 0,12 | 0,4 | 0,14 |
| 23.08.2016 17:48 | 129,89 | 5,75 | 0,96 | 1,11 | 0,25 | 2,1 | 0,2 | 1,37 | 0,06 | 0,2 | 0,09 |
| 23.08.2016 17:49 | 42,72 | 11,46 | 0,04 | 0,92 | 0,09 | 7,77 | 0,09 | 4,06 | 0 | 0,03 | 0,01 |
| 23.08.2016 17:50 | 351,12 | 8,02 | 0,41 | 0,31 | 0,29 | 0,47 | 0,06 | 0,32 | 0,17 | 0,34 | 0,15 |
| 23.08.2016 17:51 | 161,71 | 4,67 | 0,59 | 0,72 | 0,18 | 0,87 | 0,08 | 0,75 | 0,05 | 0,24 | 0,09 |
| 23.08.2016 17:52 | 220,11 | 10,09 | 0,58 | 0,59 | 0,22 | 4,43 | 0,14 | 2,35 | 0,09 | 0,2 | 0,07 |
| 23.08.2016 17:53 | 267,12 | 6,97 | 0,31 | 0,43 | 0,34 | 0,45 | 0,16 | 0,4 | 0,1 | 0,37 | 0,14 |
| 23.08.2016 17:54 | 95,07 | 7,06 | 0,82 | 1,1 | 0,19 | 3,7 | 0,16 | 2,12 | 0,05 | 0,11 | 0,06 |
| 23.08.2016 17:55 | 329,57 | 8,57 | 0,33 | 0,38 | 0,28 | 1,5 | 0,04 | 0,87 | 0,15 | 0,28 | 0,14 |
| 23.08.2016 17:56 | 195,09 | 5,51 | 0,59 | 0,58 | 0,22 | 0,63 | 0,08 | 0,53 | 0,08 | 0,35 | 0,09 |
| 23.08.2016 17:57 | 104,48 | 9,15 | 0,62 | 0,8 | 0,16 | 5,21 | 0,18 | 2,84 | 0,04 | 0,13 | 0,03 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|------------------|--------|-------|------|------|------|-------|------|------|------|------|------|
| 23.08.2016 17:58 | 328,75 | 7,68 | 0,32 | 0,4 | 0,36 | 0,41 | 0,15 | 0,38 | 0,13 | 0,37 | 0,13 |
| 23.08.2016 17:59 | 148,83 | 4,18 | 0,56 | 0,93 | 0,2 | 0,89 | 0,2 | 0,77 | 0,05 | 0,17 | 0,08 |
| 23.08.2016 18:00 | 249,06 | 9,4 | 0,45 | 0,54 | 0,2 | 3,25 | 0,02 | 1,75 | 0,1 | 0,2 | 0,09 |
| 23.08.2016 18:01 | 210,38 | 5,61 | 0,48 | 0,51 | 0,19 | 0,53 | 0,06 | 0,42 | 0,06 | 0,31 | 0,09 |
| 23.08.2016 18:02 | 66,13 | 8,65 | 1,01 | 1,21 | 0,4 | 5,32 | 0,44 | 2,96 | 0,1 | 0,05 | 0,06 |
| 23.08.2016 18:03 | 275,90 | 9,15 | 0,27 | 0,47 | 0,23 | 2,85 | 0,07 | 1,56 | 0,11 | 0,25 | 0,1 |
| 23.08.2016 18:04 | 230,08 | 6,12 | 0,32 | 0,53 | 0,28 | 0,49 | 0,15 | 0,43 | 0,07 | 0,32 | 0,1 |
| 23.08.2016 18:05 | 121,74 | 7,75 | 1,11 | 1,16 | 0,22 | 3,74 | 0,22 | 2,19 | 0,06 | 0,11 | 0,08 |
| 23.08.2016 18:06 | 331,49 | 7,76 | 0,42 | 0,36 | 0,26 | 0,5 | 0,03 | 0,33 | 0,16 | 0,32 | 0,15 |
| 23.08.2016 18:07 | 145,46 | 4,64 | 0,82 | 0,92 | 0,27 | 1,13 | 0,18 | 0,89 | 0,07 | 0,21 | 0,08 |
| 23.08.2016 18:08 | 173,12 | 10,42 | 0,29 | 0,47 | 0,11 | 5,19 | 0,02 | 2,76 | 0,07 | 0,16 | 0,05 |
| 23.08.2016 18:09 | 277,06 | 7,18 | 0,32 | 0,44 | 0,35 | 0,47 | 0,17 | 0,41 | 0,1 | 0,37 | 0,13 |
| 23.08.2016 18:10 | 111,15 | 6,07 | 1,01 | 1,08 | 0,21 | 2,73 | 0,23 | 1,69 | 0,03 | 0,12 | 0,07 |
| 23.08.2016 18:11 | 279,62 | 9,09 | 0,28 | 0,45 | 0,29 | 2,52 | 0,05 | 1,4 | 0,13 | 0,21 | 0,11 |
| 23.08.2016 18:12 | 196,37 | 5,39 | 0,58 | 0,6 | 0,19 | 0,51 | 0,07 | 0,43 | 0,06 | 0,31 | 0,08 |
| 23.08.2016 18:13 | 56,30 | 9,45 | 0,85 | 1,12 | 0,3 | 6,07 | 0,32 | 3,31 | 0,11 | 0,04 | 0,03 |
| 23.08.2016 18:14 | 372,40 | 8,15 | 0,33 | 0,38 | 0,35 | 0,41 | 0,14 | 0,38 | 0,15 | 0,35 | 0,15 |
| 23.08.2016 18:15 | 173,84 | 5,02 | 0,48 | 0,82 | 0,23 | 0,65 | 0,17 | 0,63 | 0,07 | 0,26 | 0,11 |
| 23.08.2016 18:16 | 80,82 | 10,66 | 0,98 | 1,15 | 0,4 | 6,44 | 0,27 | 3,41 | 0,05 | 0,07 | 0,03 |
| 23.08.2016 18:17 | 269,58 | 9,39 | 0,33 | 0,45 | 0,2 | 2,91 | 0,02 | 1,54 | 0,12 | 0,2 | 0,1 |
| 23.08.2016 18:18 | 189,78 | 5,36 | 0,63 | 0,56 | 0,2 | 0,67 | 0,09 | 0,56 | 0,06 | 0,31 | 0,08 |
| 23.08.2016 18:19 | 120,08 | 9,02 | 0,69 | 0,9 | 0,22 | 4,97 | 0,27 | 2,84 | 0,05 | 0,12 | 0,04 |
| 23.08.2016 18:20 | 335,68 | 7,78 | 0,33 | 0,43 | 0,37 | 0,37 | 0,17 | 0,4 | 0,14 | 0,31 | 0,14 |
| 23.08.2016 18:21 | 151,17 | 4,98 | 0,73 | 0,88 | 0,22 | 1,31 | 0,2 | 1 | 0,06 | 0,19 | 0,1 |
| 23.08.2016 18:22 | 71,10 | 11,64 | 0,14 | 0,83 | 0,1 | 7,41 | 0,04 | 4,08 | 0,01 | 0,05 | 0,02 |
| 23.08.2016 18:23 | 348,19 | 7,95 | 0,44 | 0,31 | 0,28 | 0,45 | 0,06 | 0,33 | 0,16 | 0,31 | 0,16 |
| 23.08.2016 18:24 | 151,25 | 5,6 | 0,92 | 0,84 | 0,35 | 1,49 | 0,35 | 1,15 | 0,1 | 0,22 | 0,07 |
| 23.08.2016 18:25 | 40,54 | 12,09 | 0,13 | 0,5 | 0,03 | 8,23 | 0 | 4,58 | 0,01 | 0,04 | 0,01 |
| 23.08.2016 18:26 | 363,41 | 8,03 | 0,34 | 0,34 | 0,37 | 0,38 | 0,15 | 0,38 | 0,16 | 0,3 | 0,15 |
| 23.08.2016 18:27 | 167,68 | 4,91 | 0,65 | 0,7 | 0,25 | 0,82 | 0,19 | 0,76 | 0,08 | 0,24 | 0,09 |
| 23.08.2016 18:28 | 105,97 | 11,78 | 0,54 | 0,71 | 0,13 | 6,99 | 0,13 | 3,89 | 0,04 | 0,08 | 0,04 |
| 23.08.2016 18:29 | 320,29 | 7,6 | 0,48 | 0,3 | 0,28 | 0,45 | 0,05 | 0,33 | 0,15 | 0,33 | 0,14 |
| 23.08.2016 18:30 | 134,50 | 5,56 | 0,87 | 0,88 | 0,28 | 2,02 | 0,21 | 1,42 | 0,06 | 0,19 | 0,06 |
| 23.08.2016 18:31 | 243,01 | 10,26 | 0,25 | 0,41 | 0,19 | 4,26 | 0,06 | 2,4 | 0,11 | 0,22 | 0,08 |
| 23.08.2016 18:32 | 249,98 | 6,53 | 0,36 | 0,41 | 0,32 | 0,45 | 0,15 | 0,41 | 0,08 | 0,34 | 0,11 |
| 23.08.2016 18:33 | 84,64 | 7,95 | 0,88 | 1,1 | 0,19 | 4,66 | 0,23 | 2,76 | 0,06 | 0,08 | 0,05 |
| 23.08.2016 18:34 | 269,26 | 9,74 | 0,26 | 0,46 | 0,19 | 3,4 | 0,04 | 1,95 | 0,11 | 0,2 | 0,1 |
| 23.08.2016 18:35 | 233,60 | 6,18 | 0,5 | 0,42 | 0,23 | 0,47 | 0,06 | 0,4 | 0,07 | 0,34 | 0,08 |
| 23.08.2016 18:36 | 67,04 | 9,62 | 0,92 | 0,9 | 0,35 | 6,01 | 0,36 | 3,54 | 0,1 | 0,08 | 0,04 |
| 23.08.2016 18:37 | 321,04 | 8,81 | 0,31 | 0,34 | 0,28 | 1,87 | 0,1 | 1,15 | 0,13 | 0,29 | 0,12 |
| 23.08.2016 18:38 | 206,72 | 5,76 | 0,5 | 0,63 | 0,3 | 0,59 | 0,18 | 0,58 | 0,07 | 0,3 | 0,11 |
| 23.08.2016 18:39 | 61,17 | 10,24 | 0,63 | 0,98 | 0,23 | 6,81 | 0,24 | 3,83 | 0,05 | 0,05 | 0,01 |
| 23.08.2016 18:40 | 24,77 | 12,94 | 0,04 | 0,67 | 0,08 | 9,21 | 0,06 | 5,16 | 0,01 | 0,02 | 0 |
| 23.08.2016 18:41 | 369,86 | 8,1 | 0,44 | 0,27 | 0,28 | 0,44 | 0,05 | 0,33 | 0,17 | 0,32 | 0,17 |
| 23.08.2016 18:42 | 170,34 | 4,84 | 0,64 | 0,64 | 0,21 | 0,77 | 0,15 | 0,74 | 0,06 | 0,27 | 0,09 |
| 23.08.2016 18:43 | 17,34 | 13,78 | 0,47 | 0,61 | 0,17 | 9,98 | 0,27 | 5,56 | 0,03 | 0,01 | 0 |
| 23.08.2016 18:44 | 13,34 | 14,3 | 0 | 0,4 | 0 | 10,5 | 0 | 5,85 | 0,01 | 0 | 0 |
| 23.08.2016 18:45 | 13,47 | 14,54 | 0 | 0,64 | 0 | 10,66 | 0 | 6,02 | 0,01 | 0 | 0 |
| 23.08.2016 18:46 | 13,57 | 14,53 | 0 | 0,55 | 0 | 10,7 | 0 | 5,99 | 0 | 0 | 0 |
| 23.08.2016 18:47 | 13,55 | 14,62 | 0 | 0,26 | 0 | 10,87 | 0 | 6,03 | 0 | 0 | 0 |
| 23.08.2016 18:48 | 13,23 | 13,63 | 0 | 0,3 | 0 | 10,76 | 0 | 5,77 | 0 | 0 | 0 |
| 23.08.2016 18:49 | 12,90 | 11,78 | 0 | 0,31 | 0 | 10,42 | 0 | 5,14 | 0 | 0 | 0 |

Таблица 2 – Действующее значение фазного тока основной частоты
и коэффициенты n-х гармонических составляющих, n = 11–20

| Время | $I_{(1)}$, А | $K_{I(11)}$, % | $K_{I(12)}$, % | $K_{I(13)}$, % | $K_{I(14)}$, % | $K_{I(15)}$, % | $K_{I(16)}$, % | $K_{I(17)}$, % | $K_{I(18)}$, % | $K_{I(19)}$, % | $K_{I(20)}$, % |
|------------------|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 23.08.2016 17:09 | 12,99 | 5,02 | 0 | 3,91 | 0,01 | 0 | 0 | 0,17 | 0 | 0,13 | 0 |
| 23.08.2016 17:10 | 14,14 | 4,73 | 0 | 3,88 | 0 | 0,22 | 0 | 0,31 | 0 | 0,33 | 0 |
| 23.08.2016 17:11 | 17,34 | 3,38 | 0 | 4,1 | 0 | 0,98 | 0 | 1,1 | 0 | 0,52 | 0 |
| 23.08.2016 17:12 | 13,10 | 4,88 | 0 | 3,96 | 0 | 0,05 | 0 | 0,19 | 0 | 0,12 | 0 |
| 23.08.2016 17:13 | 12,98 | 5,02 | 0 | 3,95 | 0 | 0 | 0 | 0,13 | 0 | 0,12 | 0 |
| 23.08.2016 17:14 | 18,06 | 3,47 | 0 | 4,08 | 0 | 1,08 | 0 | 1,06 | 0 | 0,65 | 0 |
| 23.08.2016 17:15 | 286,78 | 5,24 | 0,11 | 4,43 | 0,15 | 0,38 | 0,14 | 0,39 | 0 | 0,2 | 0,11 |
| 23.08.2016 17:16 | 218,35 | 4,27 | 0,13 | 2,63 | 0,16 | 0,19 | 0,12 | 0,11 | 0 | 0,04 | 0,08 |
| 23.08.2016 17:17 | 75,41 | 3,53 | 0,01 | 2,91 | 0,02 | 0,06 | 0,01 | 0,06 | 0 | 0,11 | 0 |
| 23.08.2016 17:18 | 207,01 | 5,32 | 0,1 | 4,16 | 0,08 | 0,14 | 0,1 | 0,13 | 0,01 | 0,15 | 0,08 |
| 23.08.2016 17:19 | 259,36 | 4,95 | 0,15 | 3,43 | 0,16 | 0,26 | 0,17 | 0,15 | 0 | 0,07 | 0,13 |
| 23.08.2016 17:20 | 100,58 | 3,27 | 0,03 | 2,42 | 0,04 | 0,05 | 0,02 | 0,06 | 0 | 0,11 | 0,01 |
| 23.08.2016 17:21 | 166,94 | 5,17 | 0,05 | 4,03 | 0,07 | 0,1 | 0,06 | 0,17 | 0 | 0,19 | 0,04 |
| 23.08.2016 17:22 | 261,22 | 5,04 | 0,16 | 3,51 | 0,19 | 0,25 | 0,17 | 0,16 | 0 | 0,05 | 0,13 |
| 23.08.2016 17:23 | 102,11 | 2,85 | 0,03 | 2,26 | 0,04 | 0,08 | 0,01 | 0,04 | 0 | 0,1 | 0 |
| 23.08.2016 17:24 | 284,13 | 5,49 | 0,16 | 4,28 | 0,12 | 0,21 | 0,15 | 0,18 | 0,01 | 0,13 | 0,12 |
| 23.08.2016 17:25 | 238,27 | 4,66 | 0,17 | 3,05 | 0,14 | 0,23 | 0,15 | 0,12 | 0 | 0,05 | 0,11 |
| 23.08.2016 17:26 | 70,10 | 3,83 | 0,04 | 3,09 | 0,03 | 0,06 | 0,02 | 0,12 | 0 | 0,14 | 0,01 |
| 23.08.2016 17:27 | 105,38 | 4,99 | 0,02 | 3,78 | 0,04 | 0,08 | 0,03 | 0,18 | 0 | 0,21 | 0,02 |
| 23.08.2016 17:28 | 314,61 | 5,45 | 0,16 | 4,03 | 0,23 | 0,26 | 0,2 | 0,21 | 0 | 0,09 | 0,16 |
| 23.08.2016 17:29 | 125,15 | 2,98 | 0,05 | 2,08 | 0,05 | 0,08 | 0,03 | 0,08 | 0 | 0,1 | 0,01 |
| 23.08.2016 17:30 | 210,22 | 5,2 | 0,1 | 4,07 | 0,08 | 0,14 | 0,1 | 0,13 | 0,01 | 0,2 | 0,08 |
| 23.08.2016 17:31 | 269,52 | 5,06 | 0,19 | 3,6 | 0,15 | 0,29 | 0,18 | 0,16 | 0 | 0,07 | 0,14 |
| 23.08.2016 17:32 | 100,05 | 3,57 | 0,04 | 2,4 | 0,05 | 0,05 | 0,03 | 0,07 | 0 | 0,19 | 0,01 |
| 23.08.2016 17:33 | 308,51 | 5,57 | 0,12 | 4,22 | 0,17 | 0,22 | 0,16 | 0,2 | 0 | 0,17 | 0,13 |
| 23.08.2016 17:34 | 184,27 | 3,75 | 0,11 | 2,13 | 0,12 | 0,13 | 0,09 | 0,09 | 0 | 0,05 | 0,05 |
| 23.08.2016 17:35 | 64,05 | 4,03 | 0,01 | 3,21 | 0,02 | 0,04 | 0,01 | 0,07 | 0 | 0,17 | 0 |
| 23.08.2016 17:36 | 366,10 | 5,68 | 0,2 | 4,46 | 0,18 | 0,32 | 0,22 | 0,21 | 0,01 | 0,12 | 0,18 |
| 23.08.2016 17:37 | 167,52 | 3,35 | 0,08 | 2,2 | 0,09 | 0,14 | 0,08 | 0,09 | 0 | 0,06 | 0,05 |
| 23.08.2016 17:38 | 207,62 | 5,35 | 0,06 | 4,05 | 0,09 | 0,11 | 0,08 | 0,17 | 0 | 0,17 | 0,07 |
| 23.08.2016 17:39 | 254,99 | 4,92 | 0,16 | 3,39 | 0,18 | 0,27 | 0,16 | 0,16 | 0 | 0,06 | 0,11 |
| 23.08.2016 17:40 | 80,62 | 3,42 | 0,02 | 2,62 | 0,02 | 0,04 | 0,01 | 0,09 | 0 | 0,1 | 0 |
| 23.08.2016 17:41 | 292,78 | 5,46 | 0,15 | 4,33 | 0,13 | 0,22 | 0,16 | 0,17 | 0,01 | 0,14 | 0,12 |
| 23.08.2016 17:42 | 232,72 | 4,55 | 0,14 | 2,94 | 0,12 | 0,23 | 0,14 | 0,11 | 0 | 0,04 | 0,1 |
| 23.08.2016 17:43 | 62,00 | 4,02 | 0,03 | 3,15 | 0,02 | 0,04 | 0,01 | 0,19 | 0 | 0,14 | 0 |
| 23.08.2016 17:44 | 364,48 | 5,71 | 0,14 | 4,35 | 0,19 | 0,27 | 0,2 | 0,22 | 0,01 | 0,14 | 0,16 |
| 23.08.2016 17:45 | 174,54 | 3,62 | 0,09 | 2,22 | 0,1 | 0,13 | 0,08 | 0,1 | 0 | 0,08 | 0,05 |
| 23.08.2016 17:46 | 149,58 | 4,85 | 0,05 | 3,88 | 0,05 | 0,13 | 0,06 | 0,1 | 0,01 | 0,18 | 0,04 |
| 23.08.2016 17:47 | 302,16 | 5,32 | 0,2 | 4,01 | 0,17 | 0,33 | 0,21 | 0,18 | 0,01 | 0,08 | 0,16 |
| 23.08.2016 17:48 | 129,89 | 3,31 | 0,06 | 2,23 | 0,06 | 0,1 | 0,04 | 0,07 | 0 | 0,08 | 0,02 |
| 23.08.2016 17:49 | 42,72 | 4,88 | 0 | 3,8 | 0,01 | 0,02 | 0,01 | 0,1 | 0 | 0,19 | 0,01 |
| 23.08.2016 17:50 | 351,12 | 5,7 | 0,16 | 4,33 | 0,21 | 0,28 | 0,21 | 0,22 | 0,01 | 0,11 | 0,17 |
| 23.08.2016 17:51 | 161,71 | 3,21 | 0,06 | 2,01 | 0,09 | 0,12 | 0,06 | 0,09 | 0 | 0,09 | 0,04 |
| 23.08.2016 17:52 | 220,11 | 5,29 | 0,1 | 4,19 | 0,08 | 0,17 | 0,1 | 0,16 | 0,01 | 0,15 | 0,08 |
| 23.08.2016 17:53 | 267,12 | 5,04 | 0,18 | 3,59 | 0,14 | 0,29 | 0,18 | 0,14 | 0 | 0,07 | 0,14 |
| 23.08.2016 17:54 | 95,07 | 3,48 | 0,04 | 2,46 | 0,04 | 0,07 | 0,03 | 0,07 | 0 | 0,14 | 0,01 |
| 23.08.2016 17:55 | 329,57 | 5,64 | 0,13 | 4,3 | 0,17 | 0,22 | 0,17 | 0,21 | 0,01 | 0,12 | 0,14 |
| 23.08.2016 17:56 | 195,09 | 4,01 | 0,12 | 2,54 | 0,14 | 0,19 | 0,1 | 0,1 | 0 | 0,04 | 0,06 |
| 23.08.2016 17:57 | 104,48 | 4,36 | 0,02 | 3,17 | 0,03 | 0,08 | 0,03 | 0,09 | 0 | 0,13 | 0,02 |
| 23.08.2016 17:58 | 328,75 | 5,47 | 0,2 | 4,13 | 0,17 | 0,31 | 0,2 | 0,19 | 0 | 0,1 | 0,16 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|------------------|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 23.08.2016 17:59 | 148,83 | 2,68 | 0,05 | 1,8 | 0,06 | 0,09 | 0,04 | 0,05 | 0 | 0,08 | 0,02 |
| 23.08.2016 18:00 | 249,06 | 5,42 | 0,09 | 4,17 | 0,11 | 0,16 | 0,12 | 0,15 | 0 | 0,13 | 0,09 |
| 23.08.2016 18:01 | 210,38 | 4,26 | 0,09 | 2,49 | 0,14 | 0,17 | 0,11 | 0,11 | 0 | 0,04 | 0,08 |
| 23.08.2016 18:02 | 66,13 | 3,52 | 0,02 | 2,98 | 0,03 | 0,05 | 0,01 | 0,14 | 0 | 0,15 | 0 |
| 23.08.2016 18:03 | 275,90 | 5,35 | 0,14 | 4,21 | 0,11 | 0,22 | 0,15 | 0,18 | 0,01 | 0,17 | 0,11 |
| 23.08.2016 18:04 | 230,08 | 4,55 | 0,13 | 2,88 | 0,14 | 0,21 | 0,14 | 0,11 | 0 | 0,05 | 0,1 |
| 23.08.2016 18:05 | 121,74 | 3,73 | 0,04 | 3,01 | 0,06 | 0,1 | 0,04 | 0,1 | 0 | 0,15 | 0,02 |
| 23.08.2016 18:06 | 331,49 | 5,58 | 0,15 | 4,12 | 0,2 | 0,26 | 0,2 | 0,21 | 0 | 0,11 | 0,16 |
| 23.08.2016 18:07 | 145,46 | 2,85 | 0,06 | 1,9 | 0,08 | 0,12 | 0,04 | 0,08 | 0 | 0,08 | 0,02 |
| 23.08.2016 18:08 | 173,12 | 5,28 | 0,08 | 4,09 | 0,06 | 0,13 | 0,08 | 0,13 | 0,01 | 0,24 | 0,05 |
| 23.08.2016 18:09 | 277,06 | 5,16 | 0,19 | 3,73 | 0,15 | 0,3 | 0,18 | 0,16 | 0 | 0,08 | 0,14 |
| 23.08.2016 18:10 | 111,15 | 3,11 | 0,04 | 2,28 | 0,07 | 0,07 | 0,03 | 0,07 | 0 | 0,15 | 0,01 |
| 23.08.2016 18:11 | 279,62 | 5,59 | 0,1 | 4,17 | 0,16 | 0,17 | 0,14 | 0,2 | 0,01 | 0,14 | 0,11 |
| 23.08.2016 18:12 | 196,37 | 4,09 | 0,1 | 2,32 | 0,14 | 0,17 | 0,11 | 0,1 | 0 | 0,04 | 0,07 |
| 23.08.2016 18:13 | 56,30 | 3,8 | 0,01 | 3,19 | 0,01 | 0,04 | 0 | 0,13 | 0 | 0,15 | 0 |
| 23.08.2016 18:14 | 372,40 | 5,73 | 0,22 | 4,46 | 0,18 | 0,31 | 0,22 | 0,21 | 0,01 | 0,13 | 0,17 |
| 23.08.2016 18:15 | 173,84 | 3,5 | 0,1 | 2,34 | 0,09 | 0,15 | 0,07 | 0,08 | 0 | 0,06 | 0,05 |
| 23.08.2016 18:16 | 80,82 | 4,8 | 0,02 | 3,45 | 0,03 | 0,04 | 0,02 | 0,16 | 0 | 0,17 | 0,02 |
| 23.08.2016 18:17 | 269,58 | 5,6 | 0,11 | 4,28 | 0,14 | 0,17 | 0,14 | 0,17 | 0,01 | 0,16 | 0,11 |
| 23.08.2016 18:18 | 189,78 | 3,9 | 0,09 | 2,26 | 0,14 | 0,17 | 0,1 | 0,08 | 0 | 0,05 | 0,06 |
| 23.08.2016 18:19 | 120,08 | 4,13 | 0,03 | 3,3 | 0,04 | 0,1 | 0,04 | 0,13 | 0 | 0,19 | 0,02 |
| 23.08.2016 18:20 | 335,68 | 5,57 | 0,23 | 4,17 | 0,16 | 0,26 | 0,21 | 0,19 | 0,01 | 0,11 | 0,17 |
| 23.08.2016 18:21 | 151,17 | 3,06 | 0,06 | 2,05 | 0,07 | 0,1 | 0,05 | 0,08 | 0 | 0,09 | 0,03 |
| 23.08.2016 18:22 | 71,10 | 5,24 | 0,01 | 3,87 | 0,02 | 0,04 | 0,02 | 0,12 | 0 | 0,21 | 0,01 |
| 23.08.2016 18:23 | 348,19 | 5,68 | 0,14 | 4,28 | 0,22 | 0,25 | 0,21 | 0,21 | 0 | 0,12 | 0,17 |
| 23.08.2016 18:24 | 151,25 | 3,58 | 0,06 | 2,2 | 0,07 | 0,1 | 0,05 | 0,1 | 0 | 0,1 | 0,03 |
| 23.08.2016 18:25 | 40,54 | 5,19 | 0,01 | 3,78 | 0,01 | 0,03 | 0,01 | 0,09 | 0 | 0,19 | 0,01 |
| 23.08.2016 18:26 | 363,41 | 5,71 | 0,22 | 4,37 | 0,18 | 0,25 | 0,23 | 0,19 | 0,01 | 0,12 | 0,17 |
| 23.08.2016 18:27 | 167,68 | 3,45 | 0,09 | 2,1 | 0,1 | 0,12 | 0,07 | 0,06 | 0 | 0,09 | 0,04 |
| 23.08.2016 18:28 | 105,97 | 5,41 | 0,03 | 4,05 | 0,04 | 0,06 | 0,03 | 0,19 | 0 | 0,23 | 0,02 |
| 23.08.2016 18:29 | 320,29 | 5,47 | 0,14 | 4,06 | 0,21 | 0,25 | 0,21 | 0,18 | 0 | 0,09 | 0,16 |
| 23.08.2016 18:30 | 134,50 | 3,19 | 0,05 | 2,05 | 0,06 | 0,09 | 0,04 | 0,08 | 0 | 0,13 | 0,01 |
| 23.08.2016 18:31 | 243,01 | 5,48 | 0,12 | 4,32 | 0,09 | 0,18 | 0,12 | 0,19 | 0,01 | 0,21 | 0,09 |
| 23.08.2016 18:32 | 249,98 | 4,78 | 0,15 | 3,25 | 0,15 | 0,24 | 0,17 | 0,1 | 0 | 0,05 | 0,12 |
| 23.08.2016 18:33 | 84,64 | 3,61 | 0,03 | 2,68 | 0,04 | 0,06 | 0,02 | 0,15 | 0 | 0,14 | 0,01 |
| 23.08.2016 18:34 | 269,26 | 5,56 | 0,08 | 4,28 | 0,12 | 0,16 | 0,13 | 0,2 | 0,01 | 0,19 | 0,1 |
| 23.08.2016 18:35 | 233,60 | 4,63 | 0,11 | 2,96 | 0,17 | 0,21 | 0,15 | 0,11 | 0 | 0,05 | 0,1 |
| 23.08.2016 18:36 | 67,04 | 4,14 | 0,03 | 3,1 | 0,01 | 0,04 | 0,01 | 0,14 | 0 | 0,16 | 0 |
| 23.08.2016 18:37 | 321,04 | 5,51 | 0,17 | 4,35 | 0,15 | 0,25 | 0,18 | 0,18 | 0,01 | 0,12 | 0,14 |
| 23.08.2016 18:38 | 206,72 | 4,15 | 0,14 | 2,63 | 0,12 | 0,19 | 0,12 | 0,08 | 0 | 0,06 | 0,09 |
| 23.08.2016 18:39 | 61,17 | 4,4 | 0,01 | 3,11 | 0,01 | 0,02 | 0,01 | 0,14 | 0 | 0,18 | 0,01 |
| 23.08.2016 18:40 | 24,77 | 5,19 | 0 | 3,96 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,12 | 0 | 0,29 | 0 |
| 23.08.2016 18:41 | 369,86 | 5,76 | 0,14 | 4,4 | 0,21 | 0,25 | 0,21 | 0,21 | 0,01 | 0,12 | 0,17 |
| 23.08.2016 18:42 | 170,34 | 3,33 | 0,09 | 2,16 | 0,1 | 0,16 | 0,07 | 0,08 | 0 | 0,08 | 0,04 |
| 23.08.2016 18:43 | 17,34 | 5,33 | 0 | 4,05 | 0 | 0 | 0 | 0,16 | 0 | 0,37 | 0 |
| 23.08.2016 18:44 | 13,34 | 5,5 | 0 | 4,18 | 0,01 | 0 | 0 | 0,23 | 0 | 0,32 | 0 |
| 23.08.2016 18:45 | 13,47 | 5,55 | 0 | 4,31 | 0 | 0 | 0 | 0,14 | 0 | 0,52 | 0 |
| 23.08.2016 18:46 | 13,57 | 5,57 | 0 | 4,22 | 0 | 0 | 0 | 0,11 | 0 | 0,31 | 0 |
| 23.08.2016 18:47 | 13,55 | 5,59 | 0 | 4,19 | 0 | 0 | 0 | 0,21 | 0 | 0,33 | 0 |
| 23.08.2016 18:48 | 13,23 | 4,14 | 0 | 2,66 | 0 | 0 | 0 | 0,12 | 0 | 0,22 | 0 |
| 23.08.2016 18:49 | 12,90 | 1,8 | 0 | 0,3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Таблица 3 – Действующее значение фазного тока основной частоты
и коэффициенты n-х гармонических составляющих, n = 21–30

| Время | $I_{(1)}$, А | $K_{I(21)}$, % | $K_{I(22)}$, % | $K_{I(23)}$, % | $K_{I(24)}$, % | $K_{I(25)}$, % | $K_{I(26)}$, % | $K_{I(27)}$, % | $K_{I(28)}$, % | $K_{I(29)}$, % | $K_{I(30)}$, % |
|------------------|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 23.08.2016 17:09 | 12,99 | 0 | 0 | 2,52 | 0 | 1,65 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 23.08.2016 17:10 | 14,14 | 0,21 | 0 | 2,45 | 0 | 1,53 | 0 | 0,22 | 0 | 0,03 | 0 |
| 23.08.2016 17:11 | 17,34 | 0,87 | 0 | 2,48 | 0 | 1,25 | 0 | 0,97 | 0 | 0,1 | 0 |
| 23.08.2016 17:12 | 13,10 | 0,05 | 0 | 2,52 | 0 | 1,62 | 0 | 0,05 | 0 | 0 | 0 |
| 23.08.2016 17:13 | 12,98 | 0 | 0 | 2,55 | 0 | 1,62 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 23.08.2016 17:14 | 18,06 | 0,95 | 0 | 2,33 | 0 | 1,23 | 0 | 0,94 | 0 | 0,13 | 0 |
| 23.08.2016 17:15 | 286,78 | 0,36 | 0,13 | 2,2 | 0,1 | 1,94 | 0,12 | 0,38 | 0,12 | 0,17 | 0,01 |
| 23.08.2016 17:16 | 218,35 | 0,25 | 0,1 | 1,47 | 0,12 | 1,43 | 0,14 | 0,2 | 0,1 | 0,05 | 0 |
| 23.08.2016 17:17 | 75,41 | 0,02 | 0 | 1,42 | 0 | 1,09 | 0 | 0,02 | 0 | 0,01 | 0 |
| 23.08.2016 17:18 | 207,01 | 0,13 | 0,07 | 2,24 | 0,08 | 1,91 | 0,06 | 0,14 | 0,09 | 0,08 | 0,01 |
| 23.08.2016 17:19 | 259,36 | 0,25 | 0,12 | 1,73 | 0,13 | 1,77 | 0,13 | 0,27 | 0,15 | 0,1 | 0,01 |
| 23.08.2016 17:20 | 100,58 | 0,05 | 0,01 | 1,24 | 0,01 | 0,94 | 0,01 | 0,04 | 0,01 | 0,01 | 0 |
| 23.08.2016 17:21 | 166,94 | 0,11 | 0,05 | 2,33 | 0,04 | 1,89 | 0,05 | 0,1 | 0,05 | 0,08 | 0 |
| 23.08.2016 17:22 | 261,22 | 0,25 | 0,12 | 1,8 | 0,16 | 1,81 | 0,17 | 0,24 | 0,14 | 0,11 | 0 |
| 23.08.2016 17:23 | 102,11 | 0,05 | 0,01 | 1,09 | 0,01 | 0,84 | 0,01 | 0,05 | 0,01 | 0,01 | 0 |
| 23.08.2016 17:24 | 284,13 | 0,18 | 0,11 | 2,15 | 0,13 | 2,02 | 0,09 | 0,2 | 0,12 | 0,12 | 0,02 |
| 23.08.2016 17:25 | 238,27 | 0,26 | 0,09 | 1,63 | 0,14 | 1,61 | 0,1 | 0,24 | 0,13 | 0,08 | 0 |
| 23.08.2016 17:26 | 70,10 | 0,04 | 0,01 | 1,69 | 0,02 | 1,19 | 0,01 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0 |
| 23.08.2016 17:27 | 105,38 | 0,08 | 0,03 | 2,37 | 0,03 | 1,73 | 0,03 | 0,08 | 0,03 | 0,06 | 0 |
| 23.08.2016 17:28 | 314,61 | 0,26 | 0,16 | 1,93 | 0,16 | 1,95 | 0,19 | 0,24 | 0,16 | 0,16 | 0,01 |
| 23.08.2016 17:29 | 125,15 | 0,09 | 0,02 | 1,04 | 0,04 | 0,84 | 0,03 | 0,06 | 0,01 | 0,01 | 0 |
| 23.08.2016 17:30 | 210,22 | 0,13 | 0,08 | 2,23 | 0,09 | 1,88 | 0,06 | 0,13 | 0,09 | 0,09 | 0,01 |
| 23.08.2016 17:31 | 269,52 | 0,28 | 0,12 | 1,8 | 0,16 | 1,87 | 0,13 | 0,29 | 0,15 | 0,12 | 0,01 |
| 23.08.2016 17:32 | 100,05 | 0,06 | 0,01 | 1,38 | 0,01 | 0,94 | 0,02 | 0,03 | 0,03 | 0,02 | 0 |
| 23.08.2016 17:33 | 308,51 | 0,22 | 0,14 | 2,14 | 0,12 | 2,05 | 0,15 | 0,21 | 0,14 | 0,15 | 0 |
| 23.08.2016 17:34 | 184,27 | 0,17 | 0,05 | 1,16 | 0,09 | 1,07 | 0,09 | 0,12 | 0,08 | 0,04 | 0 |
| 23.08.2016 17:35 | 64,05 | 0,04 | 0 | 1,88 | 0,01 | 1,32 | 0 | 0,04 | 0,01 | 0,01 | 0 |
| 23.08.2016 17:36 | 366,10 | 0,27 | 0,17 | 2,03 | 0,17 | 2,18 | 0,14 | 0,31 | 0,17 | 0,16 | 0,02 |
| 23.08.2016 17:37 | 167,52 | 0,15 | 0,04 | 1,03 | 0,05 | 0,97 | 0,05 | 0,12 | 0,05 | 0,04 | 0 |
| 23.08.2016 17:38 | 207,62 | 0,11 | 0,08 | 2,28 | 0,05 | 1,86 | 0,07 | 0,1 | 0,07 | 0,1 | 0 |
| 23.08.2016 17:39 | 254,99 | 0,27 | 0,12 | 1,71 | 0,16 | 1,73 | 0,17 | 0,25 | 0,14 | 0,1 | 0,01 |
| 23.08.2016 17:40 | 80,62 | 0,03 | 0 | 1,38 | 0,01 | 1,01 | 0,01 | 0,02 | 0 | 0,01 | 0 |
| 23.08.2016 17:41 | 292,78 | 0,19 | 0,11 | 2,08 | 0,12 | 2,05 | 0,1 | 0,23 | 0,13 | 0,12 | 0,02 |
| 23.08.2016 17:42 | 232,72 | 0,25 | 0,09 | 1,57 | 0,12 | 1,57 | 0,1 | 0,24 | 0,12 | 0,07 | 0 |
| 23.08.2016 17:43 | 62,00 | 0,03 | 0 | 1,77 | 0 | 1,19 | 0 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0 |
| 23.08.2016 17:44 | 364,48 | 0,26 | 0,16 | 2,1 | 0,13 | 2,15 | 0,16 | 0,25 | 0,17 | 0,18 | 0,01 |
| 23.08.2016 17:45 | 174,54 | 0,15 | 0,05 | 1,17 | 0,08 | 1,04 | 0,08 | 0,12 | 0,06 | 0,04 | 0 |
| 23.08.2016 17:46 | 149,58 | 0,12 | 0,05 | 2,14 | 0,05 | 1,74 | 0,04 | 0,14 | 0,05 | 0,05 | 0,01 |
| 23.08.2016 17:47 | 302,16 | 0,3 | 0,14 | 1,88 | 0,16 | 2 | 0,14 | 0,32 | 0,17 | 0,14 | 0,01 |
| 23.08.2016 17:48 | 129,89 | 0,1 | 0,02 | 1,07 | 0,03 | 0,85 | 0,03 | 0,07 | 0,03 | 0,02 | 0 |
| 23.08.2016 17:49 | 42,72 | 0,02 | 0,01 | 2,38 | 0 | 1,58 | 0,01 | 0,02 | 0,01 | 0,02 | 0 |
| 23.08.2016 17:50 | 351,12 | 0,26 | 0,16 | 2,09 | 0,15 | 2,13 | 0,16 | 0,26 | 0,18 | 0,18 | 0,01 |
| 23.08.2016 17:51 | 161,71 | 0,15 | 0,03 | 0,96 | 0,06 | 0,89 | 0,05 | 0,11 | 0,04 | 0,04 | 0 |
| 23.08.2016 17:52 | 220,11 | 0,15 | 0,08 | 2,18 | 0,08 | 1,91 | 0,06 | 0,17 | 0,08 | 0,09 | 0,01 |
| 23.08.2016 17:53 | 267,12 | 0,28 | 0,13 | 1,78 | 0,15 | 1,87 | 0,12 | 0,29 | 0,14 | 0,1 | 0,01 |
| 23.08.2016 17:54 | 95,07 | 0,05 | 0,01 | 1,39 | 0,02 | 0,95 | 0,01 | 0,03 | 0,02 | 0,01 | 0 |
| 23.08.2016 17:55 | 329,57 | 0,21 | 0,14 | 2,15 | 0,12 | 2,04 | 0,14 | 0,2 | 0,14 | 0,16 | 0,01 |
| 23.08.2016 17:56 | 195,09 | 0,22 | 0,08 | 1,27 | 0,1 | 1,21 | 0,1 | 0,17 | 0,08 | 0,05 | 0 |
| 23.08.2016 17:57 | 104,48 | 0,09 | 0,03 | 1,89 | 0,02 | 1,47 | 0,02 | 0,08 | 0,03 | 0,04 | 0 |
| 23.08.2016 17:58 | 328,75 | 0,28 | 0,14 | 1,96 | 0,16 | 2,06 | 0,13 | 0,29 | 0,17 | 0,15 | 0,01 |

Таблица 4 – Действующее значение фазного тока основной частоты
и коэффициенты n-х гармонических составляющих, n = 31–40

| Время | $I_{(1)}$, А | $K_{I(31)}$, % | $K_{I(32)}$, % | $K_{I(33)}$, % | $K_{I(34)}$, % | $K_{I(35)}$, % | $K_{I(36)}$, % | $K_{I(37)}$, % | $K_{I(38)}$, % | $K_{I(39)}$, % | $K_{I(40)}$, % |
|------------------|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 23.08.2016 17:09 | 12,99 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1,22 | 0 | 0,21 | 0 | 0 | 0 |
| 23.08.2016 17:10 | 14,14 | 0,02 | 0 | 0,13 | 0 | 1,25 | 0 | 0,26 | 0 | 0,16 | 0 |
| 23.08.2016 17:11 | 17,34 | 0,01 | 0 | 0,38 | 0 | 1,21 | 0 | 0,07 | 0 | 0,62 | 0 |
| 23.08.2016 17:12 | 13,10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1,38 | 0 | 0,1 | 0 | 0,04 | 0 |
| 23.08.2016 17:13 | 12,98 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1,3 | 0 | 0,2 | 0 | 0 | 0 |
| 23.08.2016 17:14 | 18,06 | 0,05 | 0 | 0,43 | 0 | 1,06 | 0 | 0,13 | 0 | 0,57 | 0 |
| 23.08.2016 17:15 | 286,78 | 0,08 | 0,08 | 0,21 | 0,11 | 1,01 | 0,09 | 0,92 | 0,09 | 0,29 | 0,09 |
| 23.08.2016 17:16 | 218,35 | 0,02 | 0,06 | 0,17 | 0,1 | 0,64 | 0,11 | 0,81 | 0,15 | 0,18 | 0,1 |
| 23.08.2016 17:17 | 75,41 | 0,03 | 0 | 0,01 | 0 | 0,73 | 0 | 0,18 | 0 | 0,01 | 0 |
| 23.08.2016 17:18 | 207,01 | 0,07 | 0,06 | 0,1 | 0,07 | 1,14 | 0,06 | 0,64 | 0,04 | 0,13 | 0,06 |
| 23.08.2016 17:19 | 259,36 | 0,05 | 0,1 | 0,17 | 0,13 | 0,8 | 0,12 | 0,99 | 0,12 | 0,24 | 0,13 |
| 23.08.2016 17:20 | 100,58 | 0,02 | 0,01 | 0,03 | 0,01 | 0,58 | 0,01 | 0,28 | 0,01 | 0,03 | 0,01 |
| 23.08.2016 17:21 | 166,94 | 0,05 | 0,04 | 0,08 | 0,05 | 1,2 | 0,04 | 0,71 | 0,04 | 0,09 | 0,05 |
| 23.08.2016 17:22 | 261,22 | 0,04 | 0,1 | 0,19 | 0,12 | 0,82 | 0,14 | 0,99 | 0,15 | 0,2 | 0,11 |
| 23.08.2016 17:23 | 102,11 | 0,02 | 0 | 0,02 | 0 | 0,55 | 0,01 | 0,24 | 0,01 | 0,03 | 0,01 |
| 23.08.2016 17:24 | 284,13 | 0,09 | 0,09 | 0,13 | 0,1 | 1,04 | 0,1 | 0,9 | 0,07 | 0,17 | 0,09 |
| 23.08.2016 17:25 | 238,27 | 0,03 | 0,09 | 0,19 | 0,09 | 0,71 | 0,11 | 0,91 | 0,1 | 0,21 | 0,11 |
| 23.08.2016 17:26 | 70,10 | 0,03 | 0,01 | 0,02 | 0,01 | 0,86 | 0,01 | 0,29 | 0,01 | 0,02 | 0,01 |
| 23.08.2016 17:27 | 105,38 | 0,04 | 0,02 | 0,07 | 0,03 | 1,29 | 0,03 | 0,57 | 0,03 | 0,08 | 0,03 |
| 23.08.2016 17:28 | 314,61 | 0,07 | 0,11 | 0,19 | 0,14 | 0,86 | 0,14 | 1,03 | 0,16 | 0,2 | 0,12 |
| 23.08.2016 17:29 | 125,15 | 0,02 | 0,01 | 0,05 | 0,02 | 0,46 | 0,04 | 0,3 | 0,04 | 0,04 | 0,02 |
| 23.08.2016 17:30 | 210,22 | 0,06 | 0,06 | 0,1 | 0,07 | 1,16 | 0,07 | 0,69 | 0,04 | 0,12 | 0,06 |
| 23.08.2016 17:31 | 269,52 | 0,05 | 0,11 | 0,2 | 0,12 | 0,82 | 0,13 | 1,01 | 0,12 | 0,24 | 0,12 |
| 23.08.2016 17:32 | 100,05 | 0,04 | 0,01 | 0,03 | 0,01 | 0,63 | 0,01 | 0,32 | 0,02 | 0,03 | 0,03 |
| 23.08.2016 17:33 | 308,51 | 0,08 | 0,1 | 0,17 | 0,12 | 1,03 | 0,11 | 1,07 | 0,12 | 0,19 | 0,11 |
| 23.08.2016 17:34 | 184,27 | 0,01 | 0,05 | 0,11 | 0,06 | 0,49 | 0,08 | 0,58 | 0,09 | 0,11 | 0,07 |
| 23.08.2016 17:35 | 64,05 | 0,03 | 0 | 0,03 | 0,01 | 0,98 | 0,01 | 0,22 | 0 | 0,03 | 0,01 |
| 23.08.2016 17:36 | 366,10 | 0,1 | 0,13 | 0,19 | 0,16 | 0,91 | 0,13 | 1,18 | 0,12 | 0,27 | 0,13 |
| 23.08.2016 17:37 | 167,52 | 0,03 | 0,04 | 0,1 | 0,06 | 0,44 | 0,04 | 0,53 | 0,05 | 0,11 | 0,05 |
| 23.08.2016 17:38 | 207,62 | 0,06 | 0,05 | 0,08 | 0,07 | 1,17 | 0,04 | 0,65 | 0,05 | 0,09 | 0,05 |
| 23.08.2016 17:39 | 254,99 | 0,04 | 0,08 | 0,19 | 0,12 | 0,75 | 0,14 | 0,92 | 0,17 | 0,21 | 0,12 |
| 23.08.2016 17:40 | 80,62 | 0,02 | 0 | 0,01 | 0 | 0,69 | 0,01 | 0,19 | 0,01 | 0,01 | 0 |
| 23.08.2016 17:41 | 292,78 | 0,09 | 0,09 | 0,14 | 0,1 | 0,94 | 0,09 | 0,88 | 0,08 | 0,2 | 0,09 |
| 23.08.2016 17:42 | 232,72 | 0,03 | 0,08 | 0,17 | 0,1 | 0,68 | 0,1 | 0,85 | 0,1 | 0,2 | 0,1 |
| 23.08.2016 17:43 | 62,00 | 0,02 | 0 | 0,01 | 0 | 0,85 | 0 | 0,25 | 0 | 0,01 | 0,01 |
| 23.08.2016 17:44 | 364,48 | 0,11 | 0,12 | 0,19 | 0,15 | 1,01 | 0,11 | 1,2 | 0,13 | 0,21 | 0,12 |
| 23.08.2016 17:45 | 174,54 | 0,03 | 0,04 | 0,11 | 0,04 | 0,49 | 0,07 | 0,57 | 0,08 | 0,1 | 0,05 |
| 23.08.2016 17:46 | 149,58 | 0,06 | 0,03 | 0,1 | 0,05 | 1,06 | 0,04 | 0,55 | 0,03 | 0,14 | 0,05 |
| 23.08.2016 17:47 | 302,16 | 0,06 | 0,13 | 0,21 | 0,14 | 0,81 | 0,13 | 1,07 | 0,13 | 0,27 | 0,14 |
| 23.08.2016 17:48 | 129,89 | 0,03 | 0,01 | 0,06 | 0,02 | 0,49 | 0,02 | 0,36 | 0,03 | 0,06 | 0,03 |
| 23.08.2016 17:49 | 42,72 | 0,02 | 0 | 0,02 | 0,01 | 1,32 | 0 | 0,25 | 0,01 | 0,02 | 0,01 |
| 23.08.2016 17:50 | 351,12 | 0,08 | 0,13 | 0,19 | 0,14 | 0,97 | 0,13 | 1,15 | 0,13 | 0,21 | 0,13 |
| 23.08.2016 17:51 | 161,71 | 0,03 | 0,03 | 0,09 | 0,04 | 0,4 | 0,05 | 0,5 | 0,05 | 0,09 | 0,04 |
| 23.08.2016 17:52 | 220,11 | 0,07 | 0,06 | 0,11 | 0,07 | 1,1 | 0,06 | 0,67 | 0,04 | 0,15 | 0,06 |
| 23.08.2016 17:53 | 267,12 | 0,04 | 0,1 | 0,19 | 0,13 | 0,78 | 0,13 | 1,02 | 0,11 | 0,25 | 0,12 |
| 23.08.2016 17:54 | 95,07 | 0,03 | 0,01 | 0,03 | 0,01 | 0,65 | 0,01 | 0,32 | 0,01 | 0,03 | 0,02 |
| 23.08.2016 17:55 | 329,57 | 0,1 | 0,1 | 0,16 | 0,11 | 1,02 | 0,1 | 1,01 | 0,11 | 0,17 | 0,1 |
| 23.08.2016 17:56 | 195,09 | 0,02 | 0,04 | 0,13 | 0,08 | 0,48 | 0,1 | 0,58 | 0,11 | 0,13 | 0,06 |
| 23.08.2016 17:57 | 104,48 | 0,05 | 0,02 | 0,07 | 0,03 | 1 | 0,02 | 0,49 | 0,02 | 0,09 | 0,03 |
| 23.08.2016 17:58 | 328,75 | 0,07 | 0,12 | 0,2 | 0,13 | 0,85 | 0,13 | 1,08 | 0,12 | 0,24 | 0,13 |

Таблица 5 – Действующее значение основной гармонической составляющей напряжения и коэффициенты n-х гармонических составляющих, n = 3–19

| Время | U ₍₁₎ , В | K _U , % | K _{U(3)} , % | K _{U(5)} , % | K _{U(7)} , % | K _{U(9)} , % | K _{U(11)} , % | K _{U(13)} , % | K _{U(15)} , % | K _{U(17)} , % | K _{U(19)} , % |
|------------------|----------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 23.08.2016 17:09 | 6422,22 | 1,77 | 0,51 | 1,6 | 0,04 | 0,13 | 0,15 | 0,2 | 0,02 | 0,05 | 0,02 |
| 23.08.2016 17:10 | 6422,22 | 1,77 | 0,49 | 1,59 | 0,07 | 0,15 | 0,15 | 0,21 | 0,03 | 0,06 | 0,04 |
| 23.08.2016 17:11 | 6411,84 | 1,75 | 0,5 | 1,54 | 0,12 | 0,18 | 0,12 | 0,21 | 0,06 | 0,09 | 0,08 |
| 23.08.2016 17:12 | 6424,02 | 1,69 | 0,51 | 1,51 | 0,05 | 0,13 | 0,15 | 0,21 | 0,01 | 0,06 | 0,02 |
| 23.08.2016 17:13 | 6425,04 | 1,69 | 0,52 | 1,5 | 0,05 | 0,14 | 0,15 | 0,21 | 0,01 | 0,06 | 0,02 |
| 23.08.2016 17:14 | 6414 | 1,76 | 0,56 | 1,51 | 0,12 | 0,18 | 0,13 | 0,22 | 0,09 | 0,12 | 0,08 |
| 23.08.2016 17:15 | 6140,16 | 9,21 | 0,44 | 1,55 | 0,14 | 0,32 | 3,89 | 3,57 | 0,31 | 0,33 | 0,18 |
| 23.08.2016 17:16 | 6221,94 | 5,11 | 0,37 | 1,46 | 0,07 | 0,23 | 2,22 | 1,56 | 0,21 | 0,21 | 0,05 |
| 23.08.2016 17:17 | 6354,9 | 1,91 | 0,44 | 1,48 | 0,09 | 0,12 | 0,38 | 0,42 | 0,04 | 0,08 | 0,07 |
| 23.08.2016 17:18 | 6221,16 | 7,14 | 0,5 | 1,51 | 0,12 | 0,25 | 2,8 | 2,61 | 0,2 | 0,22 | 0,16 |
| 23.08.2016 17:19 | 6179,58 | 6,89 | 0,41 | 1,48 | 0,03 | 0,25 | 2,99 | 2,35 | 0,29 | 0,28 | 0,06 |
| 23.08.2016 17:20 | 6322,92 | 2,19 | 0,46 | 1,52 | 0,05 | 0,12 | 0,59 | 0,46 | 0,04 | 0,09 | 0,07 |
| 23.08.2016 17:21 | 6240,36 | 6,19 | 0,52 | 1,64 | 0,09 | 0,23 | 2,24 | 2,06 | 0,16 | 0,18 | 0,13 |
| 23.08.2016 17:22 | 6169,8 | 6,98 | 0,42 | 1,61 | 0,01 | 0,24 | 3,07 | 2,41 | 0,28 | 0,27 | 0,05 |
| 23.08.2016 17:23 | 6312 | 2,17 | 0,43 | 1,6 | 0,05 | 0,12 | 0,53 | 0,46 | 0,05 | 0,09 | 0,06 |
| 23.08.2016 17:24 | 6125,34 | 9,2 | 0,42 | 1,63 | 0,1 | 0,3 | 3,87 | 3,54 | 0,29 | 0,29 | 0,17 |
| 23.08.2016 17:25 | 6189,54 | 6 | 0,38 | 1,52 | 0,01 | 0,23 | 2,59 | 1,94 | 0,25 | 0,24 | 0,05 |
| 23.08.2016 17:26 | 6342,3 | 2,19 | 0,44 | 1,64 | 0,05 | 0,13 | 0,44 | 0,43 | 0,04 | 0,08 | 0,06 |
| 23.08.2016 17:27 | 6296,82 | 4,46 | 0,48 | 1,72 | 0,08 | 0,2 | 1,29 | 1,2 | 0,12 | 0,11 | 0,09 |
| 23.08.2016 17:28 | 6108,96 | 8,93 | 0,41 | 1,6 | 0,03 | 0,27 | 4,05 | 3,45 | 0,32 | 0,35 | 0,11 |
| 23.08.2016 17:29 | 6285,84 | 2,5 | 0,42 | 1,61 | 0,05 | 0,13 | 0,8 | 0,54 | 0,06 | 0,1 | 0,07 |
| 23.08.2016 17:30 | 6192,6 | 7,29 | 0,52 | 1,6 | 0,12 | 0,25 | 2,86 | 2,69 | 0,22 | 0,22 | 0,14 |
| 23.08.2016 17:31 | 6154,56 | 7,32 | 0,42 | 1,53 | 0,03 | 0,25 | 3,16 | 2,57 | 0,32 | 0,29 | 0,07 |
| 23.08.2016 17:32 | 6307,44 | 2,45 | 0,47 | 1,75 | 0,05 | 0,13 | 0,66 | 0,45 | 0,04 | 0,09 | 0,07 |
| 23.08.2016 17:33 | 6099,06 | 9,67 | 0,41 | 1,76 | 0,09 | 0,29 | 4,09 | 3,64 | 0,32 | 0,31 | 0,15 |
| 23.08.2016 17:34 | 6231,36 | 3,98 | 0,37 | 1,63 | 0,04 | 0,17 | 1,66 | 1,08 | 0,13 | 0,15 | 0,05 |
| 23.08.2016 17:35 | 6344,34 | 2,36 | 0,5 | 1,7 | 0,04 | 0,13 | 0,44 | 0,44 | 0,04 | 0,08 | 0,08 |
| 23.08.2016 17:36 | 6043,38 | 11,07 | 0,39 | 1,66 | 0,08 | 0,35 | 4,91 | 4,42 | 0,42 | 0,38 | 0,17 |
| 23.08.2016 17:37 | 6238,74 | 3,47 | 0,41 | 1,53 | 0,04 | 0,17 | 1,36 | 0,93 | 0,12 | 0,14 | 0,06 |
| 23.08.2016 17:38 | 6191,7 | 7,32 | 0,46 | 1,7 | 0,1 | 0,23 | 2,89 | 2,58 | 0,19 | 0,23 | 0,14 |
| 23.08.2016 17:39 | 6173,76 | 6,65 | 0,36 | 1,55 | 0 | 0,24 | 2,93 | 2,32 | 0,28 | 0,26 | 0,05 |
| 23.08.2016 17:40 | 6335,52 | 2,09 | 0,47 | 1,61 | 0,05 | 0,12 | 0,45 | 0,39 | 0,04 | 0,08 | 0,06 |
| 23.08.2016 17:41 | 6120,48 | 9,38 | 0,48 | 1,64 | 0,12 | 0,32 | 3,97 | 3,69 | 0,32 | 0,31 | 0,18 |
| 23.08.2016 17:42 | 6196,02 | 5,75 | 0,33 | 1,6 | 0,05 | 0,23 | 2,49 | 1,84 | 0,24 | 0,22 | 0,04 |
| 23.08.2016 17:43 | 6361,2 | 2,05 | 0,44 | 1,62 | 0,05 | 0,13 | 0,39 | 0,38 | 0,04 | 0,07 | 0,06 |
| 23.08.2016 17:44 | 6061,08 | 11,1 | 0,37 | 1,58 | 0,11 | 0,32 | 4,89 | 4,3 | 0,37 | 0,37 | 0,18 |
| 23.08.2016 17:45 | 6257,88 | 3,66 | 0,4 | 1,57 | 0,04 | 0,16 | 1,47 | 0,98 | 0,12 | 0,13 | 0,07 |
| 23.08.2016 17:46 | 6268,5 | 5,53 | 0,51 | 1,67 | 0,11 | 0,24 | 1,83 | 1,78 | 0,19 | 0,14 | 0,13 |
| 23.08.2016 17:47 | 6141,18 | 8,42 | 0,36 | 1,51 | 0,11 | 0,3 | 3,74 | 3,21 | 0,39 | 0,33 | 0,08 |
| 23.08.2016 17:48 | 6297,9 | 2,67 | 0,39 | 1,6 | 0,09 | 0,14 | 0,9 | 0,58 | 0,07 | 0,11 | 0,07 |
| 23.08.2016 17:49 | 6385,44 | 2,54 | 0,44 | 1,69 | 0,08 | 0,15 | 0,47 | 0,47 | 0,04 | 0,08 | 0,05 |
| 23.08.2016 17:50 | 6071,76 | 10,54 | 0,3 | 1,65 | 0,09 | 0,3 | 4,69 | 4,11 | 0,37 | 0,37 | 0,14 |
| 23.08.2016 17:51 | 6251,52 | 3,13 | 0,33 | 1,59 | 0,05 | 0,15 | 1,19 | 0,78 | 0,1 | 0,12 | 0,08 |
| 23.08.2016 17:52 | 6188,88 | 7,58 | 0,41 | 1,7 | 0,11 | 0,27 | 2,99 | 2,82 | 0,25 | 0,24 | 0,16 |
| 23.08.2016 17:53 | 6161,94 | 7,21 | 0,33 | 1,54 | 0,07 | 0,27 | 3,12 | 2,54 | 0,32 | 0,27 | 0,06 |
| 23.08.2016 17:54 | 6316,5 | 2,33 | 0,35 | 1,62 | 0,06 | 0,14 | 0,62 | 0,46 | 0,05 | 0,09 | 0,07 |
| 23.08.2016 17:55 | 6079,14 | 10,26 | 0,32 | 1,67 | 0,12 | 0,3 | 4,49 | 3,98 | 0,33 | 0,35 | 0,19 |
| 23.08.2016 17:56 | 6233,22 | 4,37 | 0,32 | 1,61 | 0,04 | 0,19 | 1,87 | 1,29 | 0,18 | 0,16 | 0,05 |
| 23.08.2016 17:57 | 6309,24 | 3,47 | 0,43 | 1,62 | 0,07 | 0,18 | 0,99 | 0,86 | 0,1 | 0,11 | 0,08 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|------------------|---------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 23.08.2016 17:58 | 6106,14 | 9,58 | 0,33 | 1,49 | 0,09 | 0,29 | 4,24 | 3,7 | 0,38 | 0,34 | 0,12 |
| 23.08.2016 17:59 | 6272,94 | 2,66 | 0,33 | 1,56 | 0,05 | 0,13 | 0,92 | 0,63 | 0,07 | 0,1 | 0,06 |
| 23.08.2016 18:00 | 6168,78 | 8,23 | 0,3 | 1,72 | 0,1 | 0,25 | 3,35 | 2,98 | 0,24 | 0,25 | 0,14 |
| 23.08.2016 18:01 | 6222,24 | 4,91 | 0,31 | 1,68 | 0,03 | 0,18 | 2,13 | 1,43 | 0,17 | 0,19 | 0,04 |
| 23.08.2016 18:02 | 6356,58 | 2,16 | 0,43 | 1,77 | 0,05 | 0,12 | 0,32 | 0,41 | 0,04 | 0,08 | 0,06 |
| 23.08.2016 18:03 | 6141,42 | 9,01 | 0,4 | 1,74 | 0,11 | 0,3 | 3,68 | 3,41 | 0,32 | 0,28 | 0,16 |
| 23.08.2016 18:04 | 6200,82 | 5,74 | 0,34 | 1,64 | 0,06 | 0,22 | 2,47 | 1,79 | 0,22 | 0,2 | 0,05 |
| 23.08.2016 18:05 | 6289,92 | 3,63 | 0,41 | 1,74 | 0,1 | 0,16 | 1,06 | 0,95 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| 23.08.2016 18:06 | 6101,1 | 9,66 | 0,35 | 1,66 | 0,06 | 0,27 | 4,37 | 3,73 | 0,33 | 0,36 | 0,13 |
| 23.08.2016 18:07 | 6277,2 | 2,79 | 0,34 | 1,66 | 0,05 | 0,13 | 0,97 | 0,65 | 0,07 | 0,11 | 0,07 |
| 23.08.2016 18:08 | 6236,22 | 6,44 | 0,42 | 1,77 | 0,08 | 0,23 | 2,31 | 2,19 | 0,2 | 0,17 | 0,13 |
| 23.08.2016 18:09 | 6157,44 | 7,62 | 0,3 | 1,62 | 0,08 | 0,27 | 3,3 | 2,71 | 0,32 | 0,26 | 0,07 |
| 23.08.2016 18:10 | 6309,6 | 2,43 | 0,37 | 1,71 | 0,06 | 0,14 | 0,66 | 0,48 | 0,05 | 0,1 | 0,07 |
| 23.08.2016 18:11 | 6137,4 | 9,03 | 0,34 | 1,7 | 0,11 | 0,25 | 3,8 | 3,32 | 0,24 | 0,28 | 0,16 |
| 23.08.2016 18:12 | 6240,18 | 4,37 | 0,33 | 1,61 | 0,02 | 0,18 | 1,88 | 1,25 | 0,15 | 0,17 | 0,05 |
| 23.08.2016 18:13 | 6370,56 | 2,1 | 0,42 | 1,78 | 0,06 | 0,12 | 0,28 | 0,37 | 0,04 | 0,09 | 0,06 |
| 23.08.2016 18:14 | 6059,52 | 11,32 | 0,33 | 1,71 | 0,12 | 0,33 | 4,99 | 4,47 | 0,4 | 0,37 | 0,18 |
| 23.08.2016 18:15 | 6260,4 | 3,66 | 0,35 | 1,6 | 0,03 | 0,15 | 1,45 | 1,01 | 0,11 | 0,14 | 0,07 |
| 23.08.2016 18:16 | 6345,6 | 3,33 | 0,44 | 1,67 | 0,07 | 0,16 | 0,89 | 0,76 | 0,08 | 0,1 | 0,09 |
| 23.08.2016 18:17 | 6162,9 | 8,65 | 0,34 | 1,67 | 0,08 | 0,23 | 3,69 | 3,25 | 0,25 | 0,28 | 0,15 |
| 23.08.2016 18:18 | 6257,16 | 4,15 | 0,35 | 1,58 | 0,02 | 0,18 | 1,75 | 1,16 | 0,15 | 0,15 | 0,06 |
| 23.08.2016 18:19 | 6316,68 | 3,87 | 0,48 | 1,64 | 0,1 | 0,19 | 1,11 | 1,09 | 0,13 | 0,12 | 0,1 |
| 23.08.2016 18:20 | 6118,86 | 9,61 | 0,34 | 1,55 | 0,12 | 0,27 | 4,38 | 3,76 | 0,34 | 0,35 | 0,13 |
| 23.08.2016 18:21 | 6294,9 | 2,99 | 0,37 | 1,63 | 0,09 | 0,14 | 1,07 | 0,7 | 0,07 | 0,12 | 0,09 |
| 23.08.2016 18:22 | 6374,04 | 3,45 | 0,46 | 1,66 | 0,11 | 0,14 | 0,9 | 0,82 | 0,08 | 0,1 | 0,07 |
| 23.08.2016 18:23 | 6111,48 | 10,18 | 0,31 | 1,53 | 0,14 | 0,28 | 4,64 | 4,02 | 0,33 | 0,37 | 0,15 |
| 23.08.2016 18:24 | 6310,44 | 3,06 | 0,36 | 1,55 | 0,1 | 0,14 | 1,16 | 0,74 | 0,08 | 0,12 | 0,09 |
| 23.08.2016 18:25 | 6423,18 | 2,35 | 0,48 | 1,59 | 0,09 | 0,14 | 0,43 | 0,44 | 0,06 | 0,07 | 0,05 |
| 23.08.2016 18:26 | 6103,92 | 10,7 | 0,31 | 1,61 | 0,18 | 0,29 | 4,85 | 4,22 | 0,33 | 0,35 | 0,17 |
| 23.08.2016 18:27 | 6297,54 | 3,35 | 0,28 | 1,63 | 0,14 | 0,15 | 1,33 | 0,83 | 0,09 | 0,12 | 0,09 |
| 23.08.2016 18:28 | 6357,06 | 4,41 | 0,4 | 1,66 | 0,14 | 0,18 | 1,34 | 1,22 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| 23.08.2016 18:29 | 6163,02 | 8,93 | 0,26 | 1,64 | 0,12 | 0,25 | 4,08 | 3,47 | 0,32 | 0,31 | 0,1 |
| 23.08.2016 18:30 | 6338,04 | 2,7 | 0,35 | 1,69 | 0,13 | 0,13 | 0,9 | 0,58 | 0,06 | 0,11 | 0,09 |
| 23.08.2016 18:31 | 6217,26 | 8,18 | 0,41 | 1,82 | 0,19 | 0,28 | 3,26 | 3,04 | 0,26 | 0,23 | 0,17 |
| 23.08.2016 18:32 | 6227,22 | 6,4 | 0,24 | 1,72 | 0,14 | 0,24 | 2,76 | 2,11 | 0,27 | 0,2 | 0,05 |
| 23.08.2016 18:33 | 6379,62 | 2,23 | 0,32 | 1,76 | 0,14 | 0,13 | 0,48 | 0,43 | 0,04 | 0,08 | 0,08 |
| 23.08.2016 18:34 | 6197,58 | 8,78 | 0,38 | 1,75 | 0,17 | 0,25 | 3,65 | 3,28 | 0,25 | 0,28 | 0,17 |
| 23.08.2016 18:35 | 6248,64 | 5,68 | 0,29 | 1,64 | 0,06 | 0,21 | 2,51 | 1,8 | 0,22 | 0,19 | 0,05 |
| 23.08.2016 18:36 | 6401,64 | 2,3 | 0,35 | 1,87 | 0,12 | 0,12 | 0,41 | 0,41 | 0,05 | 0,09 | 0,08 |
| 23.08.2016 18:37 | 6150,3 | 9,98 | 0,34 | 1,81 | 0,17 | 0,31 | 4,23 | 3,84 | 0,35 | 0,3 | 0,17 |
| 23.08.2016 18:38 | 6278,1 | 4,81 | 0,31 | 1,69 | 0,09 | 0,19 | 2,04 | 1,4 | 0,19 | 0,16 | 0,05 |
| 23.08.2016 18:39 | 6415,08 | 2,22 | 0,39 | 1,77 | 0,11 | 0,15 | 0,42 | 0,35 | 0,04 | 0,1 | 0,07 |
| 23.08.2016 18:40 | 6460,14 | 2,06 | 0,44 | 1,74 | 0,09 | 0,14 | 0,27 | 0,3 | 0,05 | 0,08 | 0,04 |
| 23.08.2016 18:41 | 6120,3 | 11 | 0,28 | 1,69 | 0,13 | 0,29 | 4,95 | 4,33 | 0,36 | 0,37 | 0,16 |
| 23.08.2016 18:42 | 6313,86 | 3,45 | 0,29 | 1,72 | 0,11 | 0,17 | 1,36 | 0,89 | 0,12 | 0,12 | 0,07 |
| 23.08.2016 18:43 | 6468,3 | 2,08 | 0,45 | 1,85 | 0,09 | 0,13 | 0,21 | 0,27 | 0,03 | 0,07 | 0,05 |
| 23.08.2016 18:44 | 6484,02 | 1,98 | 0,43 | 1,83 | 0,1 | 0,13 | 0,17 | 0,24 | 0,05 | 0,07 | 0,03 |
| 23.08.2016 18:45 | 6492,06 | 1,98 | 0,47 | 1,82 | 0,09 | 0,13 | 0,18 | 0,24 | 0,04 | 0,07 | 0,04 |
| 23.08.2016 18:46 | 6494,28 | 1,96 | 0,44 | 1,81 | 0,1 | 0,13 | 0,18 | 0,23 | 0,04 | 0,07 | 0,05 |
| 23.08.2016 18:47 | 6492,9 | 2,02 | 0,39 | 1,89 | 0,12 | 0,14 | 0,18 | 0,23 | 0,04 | 0,06 | 0,05 |
| 23.08.2016 18:48 | 6502,32 | 1,96 | 0,41 | 1,84 | 0,11 | 0,14 | 0,14 | 0,19 | 0,04 | 0,06 | 0,03 |
| 23.08.2016 18:49 | 6507,3 | 1,87 | 0,46 | 1,76 | 0,11 | 0,13 | 0,08 | 0,15 | 0,04 | 0,05 | 0 |

Таблица 6 – Действующее значение основной гармонической составляющей напряжения и коэффициенты n-х гармонических составляющих, n = 21–39

| Время | U ₍₁₎ , В | K _{U(21)} , % | K _{U(23)} , % | K _{U(25)} , % | K _{U(27)} , % | K _{U(29)} , % | K _{U(31)} , % | K _{U(33)} , % | K _{U(35)} , % | K _{U(37)} , % | K _{U(39)} , % |
|------------------|----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 23.08.2016 17:09 | 6422,22 | 0,04 | 0,15 | 0,11 | 0 | 0,03 | 0,03 | 0,05 | 0,2 | 0,15 | 0,02 |
| 23.08.2016 17:10 | 6422,22 | 0,05 | 0,15 | 0,11 | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,07 | 0,2 | 0,15 | 0,05 |
| 23.08.2016 17:11 | 6411,84 | 0,08 | 0,2 | 0,13 | 0,12 | 0,04 | 0,04 | 0,11 | 0,22 | 0,13 | 0,17 |
| 23.08.2016 17:12 | 6424,02 | 0,05 | 0,14 | 0,11 | 0,01 | 0,03 | 0,03 | 0,05 | 0,2 | 0,15 | 0,03 |
| 23.08.2016 17:13 | 6425,04 | 0,04 | 0,14 | 0,11 | 0 | 0,03 | 0,03 | 0,05 | 0,2 | 0,16 | 0,02 |
| 23.08.2016 17:14 | 6414 | 0,09 | 0,21 | 0,14 | 0,12 | 0,05 | 0,05 | 0,13 | 0,21 | 0,14 | 0,17 |
| 23.08.2016 17:15 | 6140,16 | 0,45 | 3,21 | 3,38 | 0,52 | 0,48 | 0,22 | 0,62 | 2,79 | 3,75 | 0,82 |
| 23.08.2016 17:16 | 6221,94 | 0,3 | 1,79 | 1,73 | 0,35 | 0,17 | 0,08 | 0,45 | 1,63 | 2,17 | 0,62 |
| 23.08.2016 17:17 | 6354,9 | 0,05 | 0,28 | 0,28 | 0,04 | 0,04 | 0,07 | 0,07 | 0,26 | 0,34 | 0,08 |
| 23.08.2016 17:18 | 6221,16 | 0,32 | 2,31 | 2,48 | 0,37 | 0,3 | 0,21 | 0,43 | 2,08 | 2,81 | 0,62 |
| 23.08.2016 17:19 | 6179,58 | 0,37 | 2,44 | 2,45 | 0,49 | 0,29 | 0,1 | 0,52 | 2,29 | 3,07 | 0,86 |
| 23.08.2016 17:20 | 6322,92 | 0,07 | 0,45 | 0,39 | 0,07 | 0,04 | 0,08 | 0,1 | 0,41 | 0,48 | 0,12 |
| 23.08.2016 17:21 | 6240,36 | 0,26 | 1,93 | 2,04 | 0,27 | 0,27 | 0,15 | 0,37 | 1,86 | 2,46 | 0,47 |
| 23.08.2016 17:22 | 6169,8 | 0,38 | 2,5 | 2,46 | 0,43 | 0,31 | 0,08 | 0,51 | 2,35 | 3,03 | 0,74 |
| 23.08.2016 17:23 | 6312 | 0,07 | 0,41 | 0,37 | 0,08 | 0,04 | 0,06 | 0,1 | 0,39 | 0,44 | 0,12 |
| 23.08.2016 17:24 | 6125,34 | 0,41 | 3,2 | 3,35 | 0,52 | 0,41 | 0,24 | 0,54 | 2,81 | 3,72 | 0,83 |
| 23.08.2016 17:25 | 6189,54 | 0,34 | 2,09 | 2,09 | 0,43 | 0,24 | 0,08 | 0,5 | 1,96 | 2,64 | 0,75 |
| 23.08.2016 17:26 | 6342,3 | 0,06 | 0,34 | 0,31 | 0,05 | 0,05 | 0,08 | 0,09 | 0,36 | 0,42 | 0,1 |
| 23.08.2016 17:27 | 6296,82 | 0,19 | 1,13 | 1,25 | 0,21 | 0,17 | 0,1 | 0,3 | 1,21 | 1,71 | 0,4 |
| 23.08.2016 17:28 | 6108,96 | 0,44 | 3,31 | 3,29 | 0,51 | 0,47 | 0,16 | 0,59 | 2,87 | 3,63 | 0,8 |
| 23.08.2016 17:29 | 6285,84 | 0,1 | 0,6 | 0,52 | 0,1 | 0,07 | 0,08 | 0,16 | 0,55 | 0,64 | 0,17 |
| 23.08.2016 17:30 | 6192,6 | 0,33 | 2,37 | 2,52 | 0,37 | 0,33 | 0,17 | 0,44 | 2,06 | 2,82 | 0,6 |
| 23.08.2016 17:31 | 6154,56 | 0,41 | 2,61 | 2,65 | 0,53 | 0,34 | 0,11 | 0,57 | 2,37 | 3,22 | 0,93 |
| 23.08.2016 17:32 | 6307,44 | 0,08 | 0,52 | 0,4 | 0,06 | 0,06 | 0,09 | 0,11 | 0,49 | 0,54 | 0,12 |
| 23.08.2016 17:33 | 6099,06 | 0,45 | 3,42 | 3,55 | 0,53 | 0,46 | 0,19 | 0,62 | 3,12 | 4,11 | 0,86 |
| 23.08.2016 17:34 | 6231,36 | 0,2 | 1,29 | 1,19 | 0,21 | 0,13 | 0,06 | 0,3 | 1,2 | 1,5 | 0,38 |
| 23.08.2016 17:35 | 6344,34 | 0,08 | 0,38 | 0,37 | 0,06 | 0,05 | 0,08 | 0,1 | 0,41 | 0,5 | 0,11 |
| 23.08.2016 17:36 | 6043,38 | 0,56 | 4,02 | 4,22 | 0,72 | 0,53 | 0,26 | 0,74 | 3,46 | 4,65 | 1,17 |
| 23.08.2016 17:37 | 6238,74 | 0,18 | 1,07 | 0,99 | 0,2 | 0,1 | 0,09 | 0,27 | 0,98 | 1,28 | 0,36 |
| 23.08.2016 17:38 | 6191,7 | 0,28 | 2,47 | 2,44 | 0,29 | 0,35 | 0,18 | 0,39 | 2,29 | 2,77 | 0,46 |
| 23.08.2016 17:39 | 6173,76 | 0,38 | 2,36 | 2,37 | 0,44 | 0,3 | 0,1 | 0,53 | 2,15 | 2,85 | 0,74 |
| 23.08.2016 17:40 | 6335,52 | 0,05 | 0,36 | 0,29 | 0,04 | 0,04 | 0,06 | 0,08 | 0,34 | 0,35 | 0,08 |
| 23.08.2016 17:41 | 6120,48 | 0,45 | 3,2 | 3,46 | 0,58 | 0,42 | 0,25 | 0,59 | 2,67 | 3,74 | 0,95 |
| 23.08.2016 17:42 | 6196,02 | 0,32 | 2,02 | 1,99 | 0,4 | 0,22 | 0,08 | 0,47 | 1,81 | 2,47 | 0,71 |
| 23.08.2016 17:43 | 6361,2 | 0,05 | 0,33 | 0,26 | 0,03 | 0,04 | 0,07 | 0,07 | 0,31 | 0,32 | 0,06 |
| 23.08.2016 17:44 | 6061,08 | 0,52 | 4,11 | 4,19 | 0,61 | 0,56 | 0,26 | 0,71 | 3,69 | 4,79 | 0,96 |
| 23.08.2016 17:45 | 6257,88 | 0,17 | 1,16 | 1,05 | 0,2 | 0,12 | 0,08 | 0,26 | 1,09 | 1,37 | 0,35 |
| 23.08.2016 17:46 | 6268,5 | 0,29 | 1,52 | 1,79 | 0,36 | 0,19 | 0,16 | 0,42 | 1,36 | 2,24 | 0,66 |
| 23.08.2016 17:47 | 6141,18 | 0,49 | 2,98 | 3,16 | 0,63 | 0,41 | 0,14 | 0,65 | 2,55 | 3,61 | 1,04 |
| 23.08.2016 17:48 | 6297,9 | 0,1 | 0,7 | 0,57 | 0,11 | 0,07 | 0,09 | 0,16 | 0,62 | 0,76 | 0,2 |
| 23.08.2016 17:49 | 6385,44 | 0,08 | 0,44 | 0,43 | 0,05 | 0,06 | 0,06 | 0,11 | 0,49 | 0,6 | 0,1 |
| 23.08.2016 17:50 | 6071,76 | 0,51 | 3,9 | 3,96 | 0,59 | 0,54 | 0,2 | 0,67 | 3,48 | 4,46 | 0,91 |
| 23.08.2016 17:51 | 6251,52 | 0,15 | 0,9 | 0,83 | 0,17 | 0,09 | 0,09 | 0,21 | 0,83 | 1,11 | 0,3 |
| 23.08.2016 17:52 | 6188,88 | 0,36 | 2,44 | 2,65 | 0,44 | 0,33 | 0,22 | 0,48 | 2,06 | 2,96 | 0,73 |
| 23.08.2016 17:53 | 6161,94 | 0,42 | 2,55 | 2,63 | 0,54 | 0,3 | 0,1 | 0,57 | 2,28 | 3,2 | 0,94 |
| 23.08.2016 17:54 | 6316,5 | 0,08 | 0,5 | 0,41 | 0,07 | 0,05 | 0,08 | 0,11 | 0,46 | 0,54 | 0,13 |
| 23.08.2016 17:55 | 6079,14 | 0,47 | 3,75 | 3,78 | 0,53 | 0,52 | 0,26 | 0,63 | 3,34 | 4,21 | 0,8 |
| 23.08.2016 17:56 | 6233,22 | 0,25 | 1,43 | 1,38 | 0,28 | 0,15 | 0,07 | 0,36 | 1,28 | 1,72 | 0,48 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|------------------|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 23.08.2016 17:57 | 6309,24 | 0,16 | 0,81 | 0,89 | 0,18 | 0,11 | 0,11 | 0,24 | 0,8 | 1,24 | 0,35 |
| 23.08.2016 17:58 | 6106,14 | 0,49 | 3,49 | 3,62 | 0,6 | 0,47 | 0,17 | 0,67 | 3,03 | 4,1 | 0,99 |
| 23.08.2016 17:59 | 6272,94 | 0,1 | 0,69 | 0,65 | 0,12 | 0,06 | 0,08 | 0,16 | 0,62 | 0,82 | 0,22 |
| 23.08.2016 18:00 | 6168,78 | 0,35 | 2,86 | 2,89 | 0,38 | 0,38 | 0,19 | 0,49 | 2,66 | 3,37 | 0,62 |
| 23.08.2016 18:01 | 6222,24 | 0,24 | 1,72 | 1,58 | 0,27 | 0,2 | 0,07 | 0,37 | 1,61 | 1,98 | 0,47 |
| 23.08.2016 18:02 | 6356,58 | 0,05 | 0,27 | 0,28 | 0,04 | 0,04 | 0,07 | 0,06 | 0,29 | 0,31 | 0,05 |
| 23.08.2016 18:03 | 6141,42 | 0,43 | 3,04 | 3,28 | 0,57 | 0,41 | 0,21 | 0,59 | 2,63 | 3,71 | 0,93 |
| 23.08.2016 18:04 | 6200,82 | 0,3 | 2,02 | 1,97 | 0,39 | 0,22 | 0,08 | 0,46 | 1,87 | 2,46 | 0,7 |
| 23.08.2016 18:05 | 6289,92 | 0,13 | 0,93 | 0,91 | 0,14 | 0,13 | 0,12 | 0,21 | 0,95 | 1,22 | 0,25 |
| 23.08.2016 18:06 | 6101,1 | 0,45 | 3,63 | 3,57 | 0,51 | 0,5 | 0,2 | 0,6 | 3,25 | 3,95 | 0,8 |
| 23.08.2016 18:07 | 6277,2 | 0,12 | 0,72 | 0,67 | 0,13 | 0,08 | 0,08 | 0,18 | 0,67 | 0,84 | 0,22 |
| 23.08.2016 18:08 | 6236,22 | 0,28 | 1,92 | 2,11 | 0,35 | 0,22 | 0,16 | 0,39 | 1,74 | 2,48 | 0,62 |
| 23.08.2016 18:09 | 6157,44 | 0,43 | 2,7 | 2,81 | 0,54 | 0,34 | 0,12 | 0,61 | 2,45 | 3,38 | 0,94 |
| 23.08.2016 18:10 | 6309,6 | 0,08 | 0,53 | 0,45 | 0,08 | 0,06 | 0,09 | 0,11 | 0,49 | 0,56 | 0,14 |
| 23.08.2016 18:11 | 6137,4 | 0,35 | 3,24 | 3,21 | 0,39 | 0,43 | 0,22 | 0,49 | 3,04 | 3,68 | 0,61 |
| 23.08.2016 18:12 | 6240,18 | 0,23 | 1,48 | 1,38 | 0,25 | 0,17 | 0,07 | 0,35 | 1,35 | 1,71 | 0,43 |
| 23.08.2016 18:13 | 6370,56 | 0,04 | 0,24 | 0,25 | 0,03 | 0,04 | 0,07 | 0,05 | 0,27 | 0,29 | 0,06 |
| 23.08.2016 18:14 | 6059,52 | 0,56 | 4,1 | 4,33 | 0,7 | 0,55 | 0,24 | 0,76 | 3,56 | 4,81 | 1,15 |
| 23.08.2016 18:15 | 6260,4 | 0,17 | 1,17 | 1,08 | 0,19 | 0,11 | 0,09 | 0,26 | 1,07 | 1,34 | 0,33 |
| 23.08.2016 18:16 | 6345,6 | 0,11 | 0,79 | 0,76 | 0,1 | 0,11 | 0,1 | 0,17 | 0,88 | 1,07 | 0,2 |
| 23.08.2016 18:17 | 6162,9 | 0,34 | 3,11 | 3,06 | 0,38 | 0,42 | 0,19 | 0,46 | 2,84 | 3,36 | 0,59 |
| 23.08.2016 18:18 | 6257,16 | 0,23 | 1,34 | 1,29 | 0,25 | 0,14 | 0,07 | 0,34 | 1,26 | 1,64 | 0,44 |
| 23.08.2016 18:19 | 6316,68 | 0,18 | 0,87 | 1,09 | 0,23 | 0,12 | 0,12 | 0,27 | 0,89 | 1,45 | 0,44 |
| 23.08.2016 18:20 | 6118,86 | 0,44 | 3,57 | 3,59 | 0,55 | 0,49 | 0,19 | 0,6 | 3,12 | 3,9 | 0,88 |
| 23.08.2016 18:21 | 6294,9 | 0,12 | 0,84 | 0,75 | 0,13 | 0,08 | 0,11 | 0,19 | 0,8 | 0,98 | 0,25 |
| 23.08.2016 18:22 | 6374,04 | 0,11 | 0,8 | 0,82 | 0,09 | 0,11 | 0,09 | 0,16 | 0,9 | 1,09 | 0,18 |
| 23.08.2016 18:23 | 6111,48 | 0,44 | 3,84 | 3,8 | 0,5 | 0,53 | 0,23 | 0,6 | 3,39 | 4,11 | 0,79 |
| 23.08.2016 18:24 | 6310,44 | 0,14 | 0,9 | 0,78 | 0,14 | 0,09 | 0,11 | 0,21 | 0,83 | 1,04 | 0,26 |
| 23.08.2016 18:25 | 6423,18 | 0,06 | 0,35 | 0,4 | 0,06 | 0,05 | 0,06 | 0,09 | 0,43 | 0,53 | 0,14 |
| 23.08.2016 18:26 | 6103,92 | 0,46 | 3,99 | 4,02 | 0,56 | 0,49 | 0,25 | 0,62 | 3,51 | 4,35 | 0,92 |
| 23.08.2016 18:27 | 6297,54 | 0,14 | 1,03 | 0,88 | 0,17 | 0,08 | 0,11 | 0,21 | 0,95 | 1,16 | 0,31 |
| 23.08.2016 18:28 | 6357,06 | 0,15 | 1,16 | 1,25 | 0,16 | 0,15 | 0,12 | 0,23 | 1,32 | 1,66 | 0,31 |
| 23.08.2016 18:29 | 6163,02 | 0,42 | 3,29 | 3,32 | 0,49 | 0,42 | 0,16 | 0,57 | 2,88 | 3,61 | 0,78 |
| 23.08.2016 18:30 | 6338,04 | 0,1 | 0,67 | 0,6 | 0,11 | 0,07 | 0,1 | 0,16 | 0,6 | 0,77 | 0,2 |
| 23.08.2016 18:31 | 6217,26 | 0,37 | 2,64 | 2,88 | 0,47 | 0,31 | 0,23 | 0,49 | 2,29 | 3,2 | 0,81 |
| 23.08.2016 18:32 | 6227,22 | 0,35 | 2,22 | 2,27 | 0,43 | 0,22 | 0,1 | 0,49 | 2,07 | 2,8 | 0,79 |
| 23.08.2016 18:33 | 6379,62 | 0,05 | 0,38 | 0,3 | 0,05 | 0,04 | 0,09 | 0,07 | 0,34 | 0,36 | 0,09 |
| 23.08.2016 18:34 | 6197,58 | 0,36 | 3,07 | 3,1 | 0,4 | 0,44 | 0,23 | 0,49 | 2,84 | 3,48 | 0,61 |
| 23.08.2016 18:35 | 6248,64 | 0,31 | 1,99 | 1,95 | 0,34 | 0,23 | 0,09 | 0,44 | 1,88 | 2,41 | 0,6 |
| 23.08.2016 18:36 | 6401,64 | 0,05 | 0,33 | 0,27 | 0,05 | 0,05 | 0,09 | 0,07 | 0,32 | 0,35 | 0,09 |
| 23.08.2016 18:37 | 6150,3 | 0,47 | 3,45 | 3,71 | 0,62 | 0,44 | 0,23 | 0,63 | 3,03 | 4,18 | 1,03 |
| 23.08.2016 18:38 | 6278,1 | 0,26 | 1,6 | 1,55 | 0,3 | 0,15 | 0,09 | 0,38 | 1,5 | 1,95 | 0,54 |
| 23.08.2016 18:39 | 6415,08 | 0,04 | 0,32 | 0,27 | 0,03 | 0,04 | 0,08 | 0,08 | 0,34 | 0,37 | 0,08 |
| 23.08.2016 18:40 | 6460,14 | 0,03 | 0,22 | 0,19 | 0,01 | 0,02 | 0,05 | 0,05 | 0,28 | 0,25 | 0,05 |
| 23.08.2016 18:41 | 6120,3 | 0,49 | 4,09 | 4,15 | 0,57 | 0,57 | 0,24 | 0,65 | 3,66 | 4,56 | 0,88 |
| 23.08.2016 18:42 | 6313,86 | 0,18 | 1,01 | 0,95 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,25 | 0,91 | 1,19 | 0,34 |
| 23.08.2016 18:43 | 6468,3 | 0,03 | 0,15 | 0,16 | 0,01 | 0,03 | 0,04 | 0,04 | 0,23 | 0,19 | 0,05 |
| 23.08.2016 18:44 | 6484,02 | 0,02 | 0,12 | 0,12 | 0 | 0,02 | 0,04 | 0,02 | 0,2 | 0,13 | 0,04 |
| 23.08.2016 18:45 | 6492,06 | 0,03 | 0,11 | 0,15 | 0 | 0,02 | 0,04 | 0,02 | 0,19 | 0,13 | 0,04 |
| 23.08.2016 18:46 | 6494,28 | 0,02 | 0,13 | 0,14 | 0 | 0,02 | 0,04 | 0,02 | 0,19 | 0,13 | 0,04 |
| 23.08.2016 18:47 | 6492,9 | 0,02 | 0,11 | 0,12 | 0,01 | 0,02 | 0,04 | 0,02 | 0,19 | 0,13 | 0,04 |
| 23.08.2016 18:48 | 6502,32 | 0,03 | 0,09 | 0,08 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,01 | 0,12 | 0,08 | 0,03 |
| 23.08.2016 18:49 | 6507,3 | 0,03 | 0,04 | 0,01 | 0,01 | 0 | 0 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,03 |

Таблица 7 – Действующие значения напряжений и фазных токов, суммарные коэффициенты гармонических составляющих напряжений и фазных токов, ПОЛНАЯ МОЩНОСТЬ

| Время | U _{L1} , В | U _{L2} , В | U _{L3} , В | K _{UL1} , % | K _{UL2} , % | K _{UL3} , % | I _{L1} , А | I _{L3} , А | K _{IL1} , % | K _{IL3} , % | S _Σ , ВА |
|------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 23.08.2016 17:09 | 6423,18 | 6390,36 | 6379,56 | 1,77 | 1,37 | 1,22 | 13,15 | 12,66 | 12,62 | 12,82 | 99868,55 |
| 23.08.2016 17:10 | 6423,12 | 6389,46 | 6379,68 | 1,77 | 1,4 | 1,26 | 14,35 | 13,78 | 12,23 | 12,34 | 108746,6 |
| 23.08.2016 17:11 | 6413,16 | 6379,56 | 6371,28 | 1,75 | 1,39 | 1,28 | 17,47 | 16,61 | 10,35 | 9,79 | 131393,9 |
| 23.08.2016 17:12 | 6424,86 | 6392,46 | 6380,76 | 1,69 | 1,34 | 1,21 | 13,33 | 12,80 | 12,63 | 12,84 | 101092,5 |
| 23.08.2016 17:13 | 6425,88 | 6394,56 | 6381,6 | 1,69 | 1,33 | 1,21 | 13,15 | 12,66 | 12,73 | 12,96 | 99885,83 |
| 23.08.2016 17:14 | 6415,56 | 6387,54 | 6373,92 | 1,76 | 1,4 | 1,29 | 18,24 | 17,39 | 10,7 | 10,25 | 137422,7 |
| 23.08.2016 17:15 | 6250,26 | 6222,84 | 6208,62 | 9,21 | 6,89 | 7,73 | 288,49 | 283,90 | 9,14 | 9,21 | 2119684 |
| 23.08.2016 17:16 | 6311,4 | 6287,7 | 6272,4 | 5,11 | 3,91 | 4,32 | 218,47 | 213,79 | 5,7 | 6,02 | 1638831 |
| 23.08.2016 17:17 | 6358,56 | 6327,48 | 6317,4 | 1,91 | 1,56 | 1,48 | 76,00 | 73,12 | 8,49 | 8,46 | 562779,4 |
| 23.08.2016 17:18 | 6296,34 | 6265,5 | 6251,34 | 7,14 | 5,37 | 5,98 | 209,02 | 205,52 | 10,45 | 10,66 | 1530275 |
| 23.08.2016 17:19 | 6298,98 | 6273,3 | 6254,58 | 6,89 | 5,17 | 5,82 | 260,12 | 254,86 | 6,79 | 7,11 | 1946539 |
| 23.08.2016 17:20 | 6330,72 | 6301,14 | 6289,14 | 2,19 | 1,78 | 1,77 | 100,94 | 97,54 | 6,81 | 7,01 | 747836,3 |
| 23.08.2016 17:21 | 6313,74 | 6283,98 | 6270,12 | 6,19 | 4,72 | 5,17 | 169,32 | 166,10 | 10,44 | 10,77 | 1241190 |
| 23.08.2016 17:22 | 6289,98 | 6264,12 | 6244,74 | 6,98 | 5,27 | 5,9 | 261,16 | 256,58 | 6,92 | 7,2 | 1953874 |
| 23.08.2016 17:23 | 6321,78 | 6289,44 | 6277,26 | 2,17 | 1,8 | 1,76 | 100,64 | 97,07 | 6,26 | 6,35 | 744296,7 |
| 23.08.2016 17:24 | 6222 | 6190,62 | 6174,66 | 9,2 | 6,91 | 7,78 | 287,48 | 282,72 | 9,24 | 9,48 | 2098477 |
| 23.08.2016 17:25 | 6296,46 | 6269,4 | 6251,7 | 6 | 4,56 | 5,11 | 238,75 | 233,38 | 6,31 | 6,65 | 1784242 |
| 23.08.2016 17:26 | 6349,26 | 6316,5 | 6305,34 | 2,19 | 1,74 | 1,7 | 71,71 | 69,17 | 8,61 | 8,86 | 530141,5 |
| 23.08.2016 17:27 | 6357,3 | 6323,1 | 6311,82 | 4,46 | 3,36 | 3,53 | 107,13 | 104,58 | 10,69 | 10,89 | 797631,3 |
| 23.08.2016 17:28 | 6239,16 | 6207,84 | 6190,62 | 8,93 | 6,7 | 7,55 | 314,04 | 309,07 | 7,57 | 7,83 | 2323128 |
| 23.08.2016 17:29 | 6301,74 | 6267,12 | 6257,22 | 2,5 | 2,03 | 2,01 | 124,64 | 120,22 | 5,66 | 5,74 | 920352,6 |
| 23.08.2016 17:30 | 6264,84 | 6227,76 | 6217,98 | 7,29 | 5,5 | 6,07 | 212,94 | 208,94 | 9,89 | 10,14 | 1547305 |
| 23.08.2016 17:31 | 6277,8 | 6249,66 | 6231,54 | 7,32 | 5,55 | 6,22 | 270,25 | 264,50 | 7,02 | 7,34 | 2013067 |
| 23.08.2016 17:32 | 6320,64 | 6287,82 | 6276,36 | 2,45 | 1,94 | 1,86 | 98,77 | 95,26 | 7 | 7,13 | 728958,8 |
| 23.08.2016 17:33 | 6233,88 | 6205,56 | 6190,56 | 9,67 | 7,26 | 8,14 | 311,43 | 306,27 | 8,58 | 8,84 | 2295325 |
| 23.08.2016 17:34 | 6292,92 | 6269,52 | 6255,54 | 3,98 | 3,1 | 3,32 | 185,87 | 181,26 | 5,11 | 5,41 | 1386582 |
| 23.08.2016 17:35 | 6357 | 6326,34 | 6316,2 | 2,36 | 1,84 | 1,8 | 65,29 | 62,93 | 9,38 | 9,48 | 483290,7 |
| 23.08.2016 17:36 | 6185,46 | 6157,5 | 6140,88 | 11,07 | 8,27 | 9,41 | 366,87 | 360,85 | 8,09 | 8,37 | 2691161 |
| 23.08.2016 17:37 | 6282,12 | 6252,96 | 6238,26 | 3,47 | 2,72 | 2,91 | 168,09 | 163,04 | 4,89 | 5,16 | 1246154 |
| 23.08.2016 17:38 | 6274,2 | 6241,86 | 6229,08 | 7,32 | 5,53 | 6,08 | 210,04 | 206,74 | 9,97 | 10,09 | 1535200 |
| 23.08.2016 17:39 | 6288,48 | 6258,84 | 6243,06 | 6,65 | 5,05 | 5,63 | 256,06 | 250,85 | 6,72 | 7 | 1912162 |
| 23.08.2016 17:40 | 6339,78 | 6307,38 | 6297 | 2,09 | 1,73 | 1,59 | 82,29 | 79,28 | 7,68 | 7,78 | 608597,3 |
| 23.08.2016 17:41 | 6218,22 | 6188,22 | 6177,48 | 9,38 | 7,04 | 7,88 | 296,71 | 291,41 | 9,19 | 9,43 | 2165256 |
| 23.08.2016 17:42 | 6298,8 | 6271,5 | 6259,56 | 5,75 | 4,4 | 4,9 | 233,08 | 227,63 | 6,14 | 6,48 | 1742492 |
| 23.08.2016 17:43 | 6367,14 | 6334,02 | 6324,12 | 2,05 | 1,65 | 1,63 | 61,74 | 59,41 | 9,06 | 9,31 | 457252,6 |
| 23.08.2016 17:44 | 6216,3 | 6186,36 | 6172,56 | 11,1 | 8,3 | 9,42 | 367,01 | 361,31 | 8,06 | 8,28 | 2709479 |
| 23.08.2016 17:45 | 6308,34 | 6281,04 | 6265,02 | 3,66 | 2,87 | 3,03 | 174,30 | 169,66 | 5,14 | 5,4 | 1300720 |
| 23.08.2016 17:46 | 6327,54 | 6294,66 | 6283,8 | 5,53 | 4,16 | 4,51 | 151,63 | 147,84 | 10,32 | 10,56 | 1110199 |
| 23.08.2016 17:47 | 6271,38 | 6238,62 | 6225,9 | 8,42 | 6,37 | 7,19 | 302,47 | 296,37 | 7,48 | 7,81 | 2248765 |
| 23.08.2016 17:48 | 6316,44 | 6282,54 | 6272,82 | 2,67 | 2,14 | 2,17 | 130,49 | 126,02 | 5,75 | 5,94 | 966448,8 |
| 23.08.2016 17:49 | 6402,36 | 6365,1 | 6357,24 | 2,54 | 1,99 | 1,94 | 44,75 | 43,62 | 11,46 | 11,91 | 334951,8 |
| 23.08.2016 17:50 | 6218,1 | 6185,76 | 6172,56 | 10,54 | 7,93 | 8,97 | 352,92 | 347,52 | 8,02 | 8,27 | 2603475 |
| 23.08.2016 17:51 | 6284,1 | 6252,66 | 6242,58 | 3,13 | 2,43 | 2,55 | 161,42 | 156,58 | 4,67 | 4,88 | 1196954 |
| 23.08.2016 17:52 | 6263,64 | 6230,76 | 6220,38 | 7,58 | 5,7 | 6,32 | 222,76 | 218,64 | 10,09 | 10,31 | 1620851 |
| 23.08.2016 17:53 | 6284,64 | 6258,12 | 6242,46 | 7,21 | 5,44 | 6,11 | 267,40 | 262,02 | 6,97 | 7,28 | 1995999 |
| 23.08.2016 17:54 | 6330,9 | 6300 | 6288,54 | 2,33 | 1,83 | 1,83 | 92,48 | 89,46 | 7,06 | 7,3 | 684634,8 |
| 23.08.2016 17:55 | 6209,64 | 6178,32 | 6166,08 | 10,26 | 7,7 | 8,67 | 332,92 | 328,02 | 8,57 | 8,8 | 2445699 |
| 23.08.2016 17:56 | 6306,9 | 6279,06 | 6266,34 | 4,37 | 3,36 | 3,67 | 195,15 | 190,34 | 5,51 | 5,9 | 1458956 |

Продолжение таблицы 7

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|------------------|---------|---------|---------|-------|------|------|--------|--------|-------|-------|----------|
| 23.08.2016 17:57 | 6349,68 | 6318,66 | 6307,62 | 3,47 | 2,67 | 2,78 | 104,57 | 101,23 | 9,15 | 9,4 | 775907,5 |
| 23.08.2016 17:58 | 6237,12 | 6206,64 | 6190,56 | 9,58 | 7,24 | 8,19 | 329,80 | 323,70 | 7,68 | 7,99 | 2432135 |
| 23.08.2016 17:59 | 6292,14 | 6260,52 | 6248,64 | 2,66 | 2,14 | 2,2 | 149,45 | 144,69 | 4,18 | 4,35 | 1107463 |
| 23.08.2016 18:00 | 6276,66 | 6244,8 | 6234,42 | 8,23 | 6,2 | 6,89 | 252,28 | 248,30 | 9,4 | 9,68 | 1859861 |
| 23.08.2016 18:01 | 6307,5 | 6280,68 | 6265,02 | 4,91 | 3,8 | 4,15 | 211,34 | 206,56 | 5,61 | 5,89 | 1582355 |
| 23.08.2016 18:02 | 6362,94 | 6325,74 | 6315,96 | 2,16 | 1,72 | 1,65 | 66,24 | 63,52 | 8,65 | 8,73 | 489947,3 |
| 23.08.2016 18:03 | 6242,16 | 6210,48 | 6196,86 | 9,01 | 6,74 | 7,56 | 277,40 | 272,11 | 9,15 | 9,4 | 2029444 |
| 23.08.2016 18:04 | 6303 | 6276,42 | 6260,1 | 5,74 | 4,41 | 4,85 | 229,93 | 224,56 | 6,12 | 6,44 | 1719721 |
| 23.08.2016 18:05 | 6329,7 | 6298,5 | 6285,72 | 3,63 | 2,74 | 2,81 | 125,42 | 121,68 | 7,75 | 7,8 | 931823,7 |
| 23.08.2016 18:06 | 6238,56 | 6208,86 | 6193,02 | 9,66 | 7,28 | 8,22 | 332,17 | 327,15 | 7,76 | 8,01 | 2455981 |
| 23.08.2016 18:07 | 6301,74 | 6273,96 | 6262,74 | 2,79 | 2,15 | 2,22 | 143,55 | 139,04 | 4,64 | 4,88 | 1065300 |
| 23.08.2016 18:08 | 6303,42 | 6274,86 | 6262,86 | 6,44 | 4,79 | 5,25 | 175,79 | 172,27 | 10,42 | 10,68 | 1283210 |
| 23.08.2016 18:09 | 6284,46 | 6258,54 | 6239,46 | 7,62 | 5,75 | 6,48 | 277,35 | 271,79 | 7,18 | 7,51 | 2069601 |
| 23.08.2016 18:10 | 6322,92 | 6293,04 | 6279,6 | 2,43 | 1,9 | 1,88 | 109,82 | 106,21 | 6,07 | 6,22 | 813655,6 |
| 23.08.2016 18:11 | 6261,42 | 6233,28 | 6216,78 | 9,03 | 6,77 | 7,57 | 281,74 | 277,78 | 9,09 | 9,33 | 2080651 |
| 23.08.2016 18:12 | 6314,04 | 6286,8 | 6269,58 | 4,37 | 3,36 | 3,64 | 195,77 | 191,15 | 5,39 | 5,7 | 1465820 |
| 23.08.2016 18:13 | 6373,98 | 6340,92 | 6329,16 | 2,1 | 1,55 | 1,47 | 56,08 | 53,97 | 9,45 | 9,48 | 415727,9 |
| 23.08.2016 18:14 | 6211,02 | 6182,52 | 6165 | 11,32 | 8,45 | 9,6 | 373,46 | 367,07 | 8,15 | 8,43 | 2751334 |
| 23.08.2016 18:15 | 6312,12 | 6285,72 | 6268,44 | 3,66 | 2,82 | 3,04 | 173,40 | 168,78 | 5,02 | 5,25 | 1294672 |
| 23.08.2016 18:16 | 6385,32 | 6354,66 | 6340,38 | 3,33 | 2,49 | 2,6 | 82,46 | 80,58 | 10,66 | 10,76 | 618525,5 |
| 23.08.2016 18:17 | 6268,8 | 6237,9 | 6222,3 | 8,65 | 6,49 | 7,27 | 271,43 | 268,05 | 9,39 | 9,57 | 2002546 |
| 23.08.2016 18:18 | 6324,72 | 6298,8 | 6283,26 | 4,15 | 3,17 | 3,5 | 190,99 | 186,56 | 5,36 | 5,67 | 1432614 |
| 23.08.2016 18:19 | 6360,06 | 6330,18 | 6316,44 | 3,87 | 2,87 | 3,1 | 121,00 | 117,46 | 9,02 | 9,04 | 899849,9 |
| 23.08.2016 18:20 | 6253,08 | 6227,16 | 6209,58 | 9,61 | 7,26 | 8,24 | 335,30 | 330,27 | 7,78 | 8,04 | 2486748 |
| 23.08.2016 18:21 | 6325,44 | 6299,82 | 6286,98 | 2,99 | 2,32 | 2,45 | 148,92 | 144,61 | 4,98 | 5,13 | 1110496 |
| 23.08.2016 18:22 | 6410,28 | 6380,4 | 6370,86 | 3,45 | 2,61 | 2,7 | 73,37 | 72,00 | 11,64 | 11,99 | 551323,7 |
| 23.08.2016 18:23 | 6247,02 | 6221,76 | 6206,34 | 10,18 | 7,68 | 8,72 | 350,22 | 345,70 | 7,95 | 8,18 | 2597399 |
| 23.08.2016 18:24 | 6342,84 | 6319,38 | 6305,58 | 3,06 | 2,37 | 2,52 | 151,79 | 147,74 | 5,6 | 5,82 | 1136820 |
| 23.08.2016 18:25 | 6437,04 | 6408,84 | 6397,74 | 2,35 | 1,82 | 1,76 | 42,89 | 41,82 | 12,09 | 12,46 | 324071,2 |
| 23.08.2016 18:26 | 6245,04 | 6226,2 | 6208,44 | 10,7 | 8,1 | 9,18 | 365,11 | 360,05 | 8,03 | 8,29 | 2709900 |
| 23.08.2016 18:27 | 6337,2 | 6317,58 | 6304,02 | 3,35 | 2,62 | 2,75 | 168,86 | 164,50 | 4,91 | 5,14 | 1267014 |
| 23.08.2016 18:28 | 6418,2 | 6395,28 | 6383,04 | 4,41 | 3,31 | 3,51 | 108,30 | 106,40 | 11,78 | 11,98 | 817926,6 |
| 23.08.2016 18:29 | 6296,22 | 6273,66 | 6258,9 | 8,93 | 6,77 | 7,64 | 319,85 | 315,28 | 7,6 | 7,86 | 2392506 |
| 23.08.2016 18:30 | 6358,2 | 6331,44 | 6322,2 | 2,7 | 2,13 | 2,16 | 133,69 | 129,63 | 5,56 | 5,75 | 1000365 |
| 23.08.2016 18:31 | 6301,74 | 6277,02 | 6267,9 | 8,18 | 6,12 | 6,78 | 246,99 | 242,78 | 10,26 | 10,51 | 1818437 |
| 23.08.2016 18:32 | 6342,9 | 6321,9 | 6309,96 | 6,4 | 4,84 | 5,42 | 250,41 | 245,25 | 6,53 | 6,84 | 1889189 |
| 23.08.2016 18:33 | 6385,98 | 6357,6 | 6351,48 | 2,23 | 1,7 | 1,68 | 85,71 | 82,74 | 7,95 | 8,04 | 639651,2 |
| 23.08.2016 18:34 | 6300,78 | 6271,5 | 6260,4 | 8,78 | 6,6 | 7,36 | 272,17 | 268,32 | 9,74 | 9,92 | 2014642 |
| 23.08.2016 18:35 | 6352,8 | 6328,44 | 6313,26 | 5,68 | 4,33 | 4,78 | 234,51 | 229,81 | 6,18 | 6,44 | 1771609 |
| 23.08.2016 18:36 | 6407,4 | 6375,6 | 6369,66 | 2,3 | 1,77 | 1,65 | 67,95 | 65,46 | 9,62 | 9,77 | 507200,3 |
| 23.08.2016 18:37 | 6270,12 | 6244,38 | 6230,4 | 9,98 | 7,45 | 8,4 | 323,75 | 318,24 | 8,81 | 9,09 | 2397075 |
| 23.08.2016 18:38 | 6362,64 | 6337,86 | 6324,42 | 4,81 | 3,7 | 4,04 | 205,95 | 200,93 | 5,76 | 6,06 | 1554179 |
| 23.08.2016 18:39 | 6423,66 | 6391,02 | 6384,54 | 2,22 | 1,7 | 1,63 | 59,63 | 57,71 | 10,24 | 10,4 | 446258,8 |
| 23.08.2016 18:40 | 6465,06 | 6430,32 | 6426,06 | 2,06 | 1,56 | 1,46 | 26,00 | 25,20 | 12,94 | 13,24 | 197381,2 |
| 23.08.2016 18:41 | 6274,02 | 6244,68 | 6233,7 | 11 | 8,29 | 9,38 | 370,93 | 365,73 | 8,1 | 8,34 | 2765810 |
| 23.08.2016 18:42 | 6358,92 | 6332,82 | 6325,38 | 3,45 | 2,66 | 2,8 | 170,00 | 165,23 | 4,84 | 5,07 | 1278381 |
| 23.08.2016 18:43 | 6471,48 | 6435,3 | 6431,22 | 2,08 | 1,57 | 1,44 | 17,18 | 16,67 | 13,78 | 13,87 | 131248 |
| 23.08.2016 18:44 | 6485,16 | 6449,22 | 6444,9 | 1,98 | 1,5 | 1,26 | 13,50 | 13,17 | 14,3 | 14,47 | 104275 |
| 23.08.2016 18:45 | 6493,44 | 6457,32 | 6452,22 | 1,98 | 1,51 | 1,29 | 13,65 | 13,34 | 14,54 | 14,69 | 105649,7 |
| 23.08.2016 18:46 | 6495,12 | 6457,8 | 6454,38 | 1,96 | 1,51 | 1,31 | 13,74 | 13,41 | 14,53 | 14,68 | 106329,3 |
| 23.08.2016 18:47 | 6494,04 | 6460,44 | 6456,3 | 2,02 | 1,48 | 1,29 | 13,73 | 13,44 | 14,62 | 14,65 | 106382,1 |
| 23.08.2016 18:48 | 6503,16 | 6466,74 | 6462,84 | 1,96 | 1,47 | 1,29 | 13,39 | 13,12 | 13,63 | 13,77 | 103938 |
| 23.08.2016 18:49 | 6507,9 | 6467,4 | 6464,52 | 1,87 | 1,44 | 1,27 | 13,01 | 12,75 | 11,78 | 12,03 | 101085,8 |



Рисунок 1. Установка и настройка прибора «Энергомонитор - 3.3Т1»



Рисунок 2. Регистрация электрических параметров прибором «Энергомонитор - 3.3Т1»

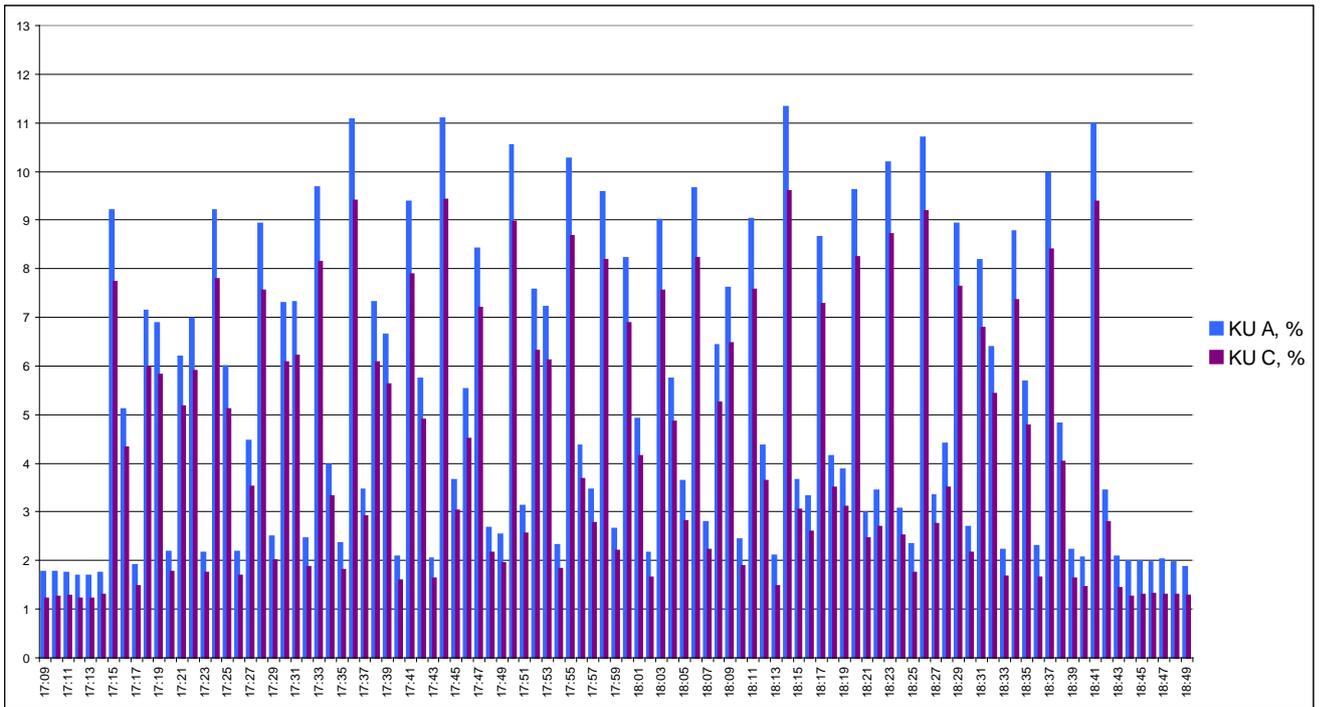


Рисунок 3. Гистограмма значений суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжений

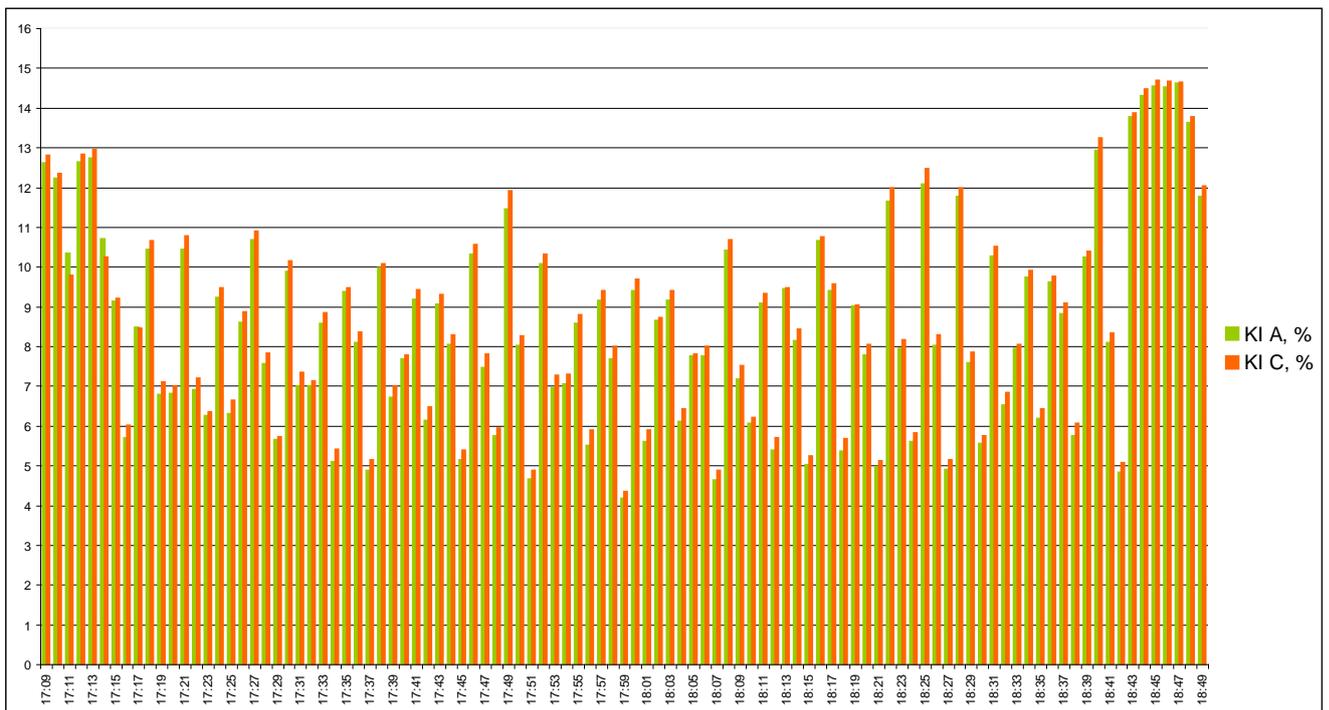


Рисунок 4. Гистограмма значений суммарных коэффициентов гармонических составляющих фазных токов

В таблицах 1–7 представлены значения следующих электрических параметров и показателей ЭМС:

- $I_{(1)}$ – действующее значение несинусоидального фазного тока основной гармоники, А;
- K_I – суммарный коэффициент гармонических составляющих тока, %;
- $K_{I(n)}$ – коэффициент n-ой гармонической составляющей тока, %;
- $U_{(1)}$ – действующее значение основной гармонической составляющей напряжения, В;
- K_U – суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения, %;
- $K_{U(n)}$ – коэффициент n-ой гармонической составляющей напряжения, %;
- U_{L1}, U_{L2}, U_{L3} – действующие значения фазных напряжений, В;
- $K_{U L1}, K_{U L2}, K_{U L3}$ – суммарные коэффициенты гармонических составляющих фазных напряжений, %;
- I_{L1}, I_{L2}, I_{L3} – действующие значения фазных токов, А;
- $K_{I L1}, K_{I L2}, K_{I L3}$ – суммарные коэффициенты гармонических составляющих фазных токов, %.
- S_{Σ} – суммарная полная мощность, ВА.

Измерения выполнили:

Аспирант кафедры «Электроэнергетика
и автоматика» БГТУ им. В.Г. Шухова

 _____ Прасол Д.А.

Начальник подъема ООО «Металл-групп»

 _____ Дробязко А.А.

Согласовано:

Главный энергетик ООО «Металл-Групп»

 _____ Глотов Ю.П.

Научный руководитель, д.т.н., профессор кафедры
«Электроэнергетика и автоматика» БГТУ им. В.Г. Шухова,

 _____ Авербух М.А.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. ИМИТАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ КЛЕТОВОЙ ПУ

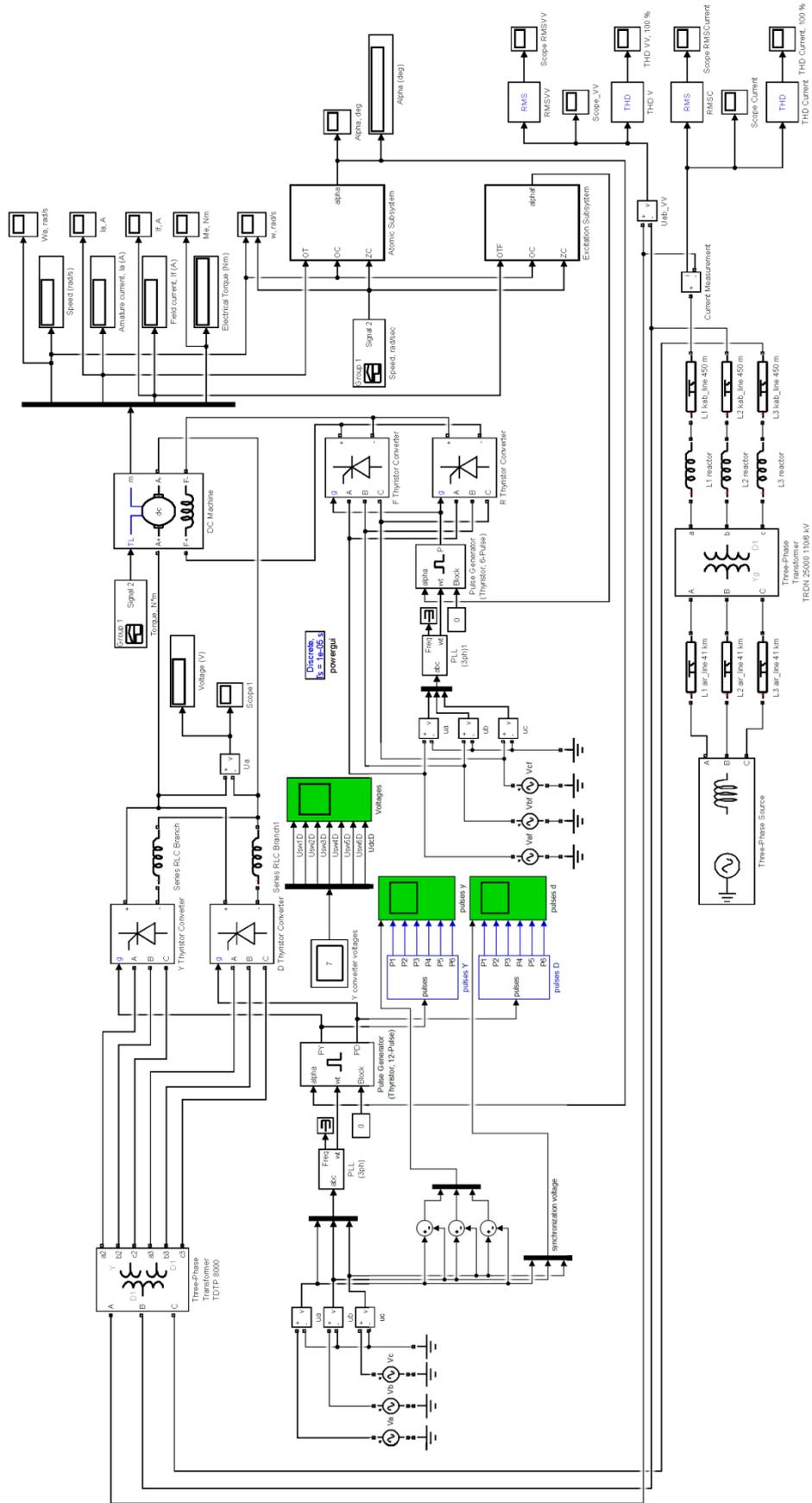


Рисунок Б.1.1. Имитационная модель высоковольтной системы электроснабжения клетовой ПУ

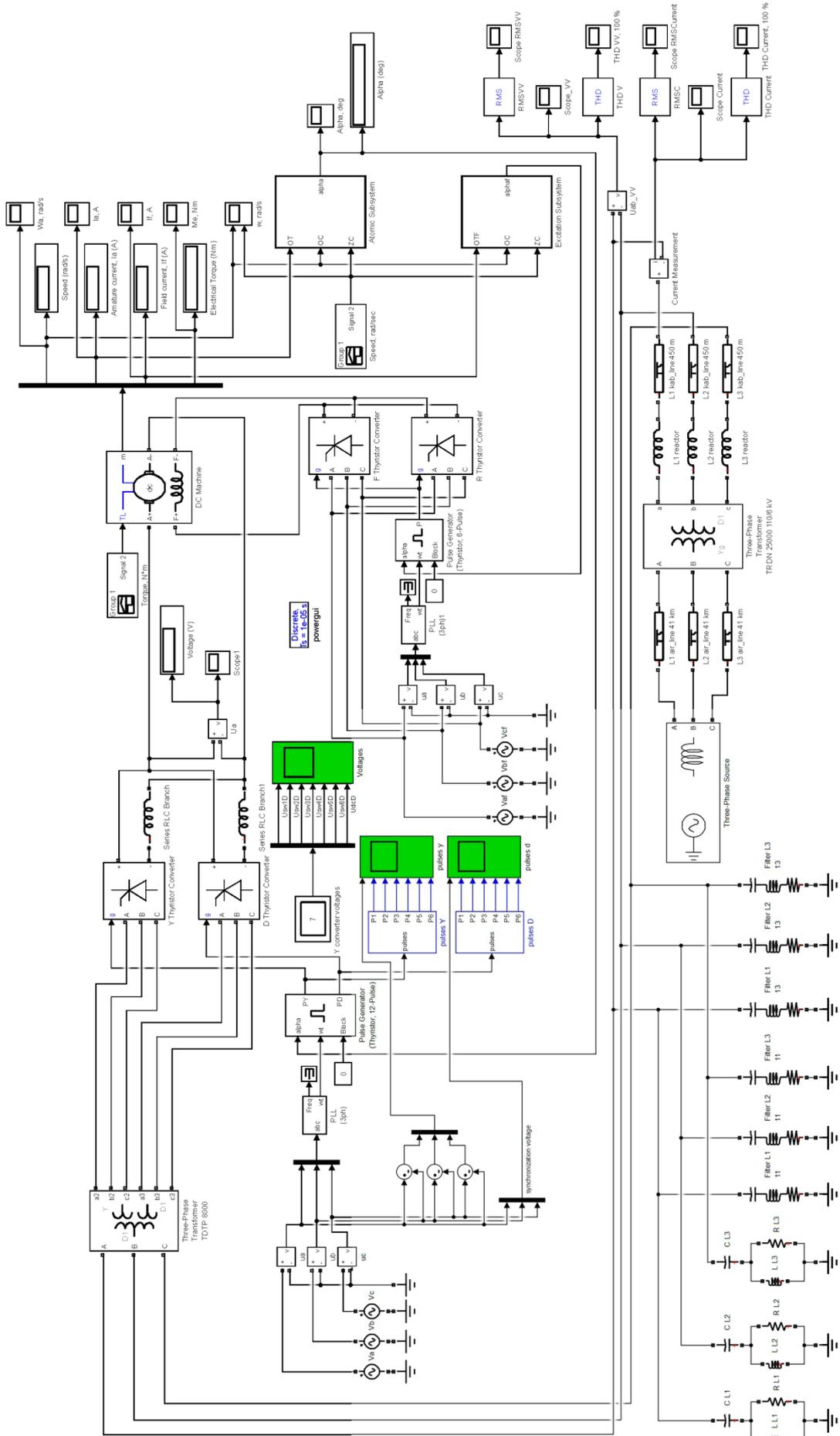


Рисунок Б.2. Имитационная модель высоковольтной системы электроснабжения клетевой ПУ с установкой ФКУ

ПРИЛОЖЕНИЕ В. ГРАФИКИ НАГРУЗКИ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ КЛЕТЕВОЙ ПУ

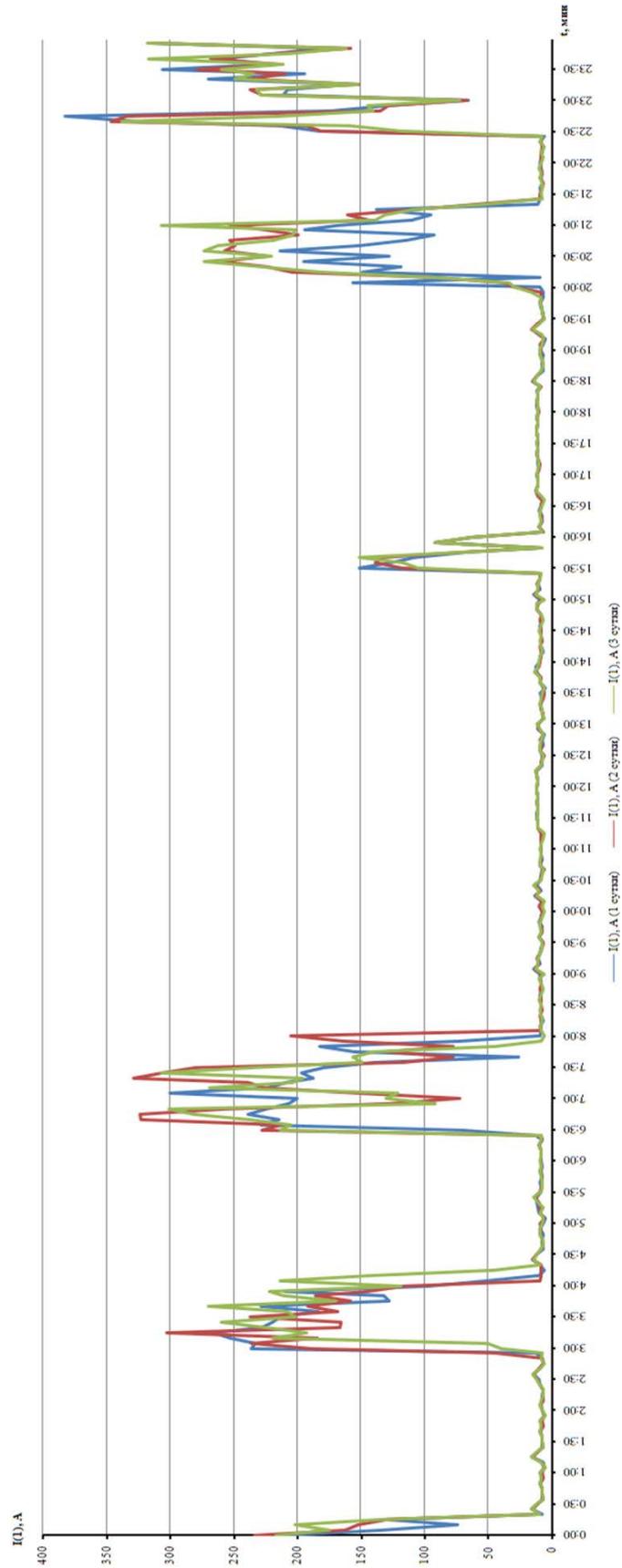


Рисунок В.1. Суточный график нагрузки по току основной частоты высоковольтной сети клетевой ПУ

Уравнения трендов тока основной частоты, тока искажения и токов 11, 13, 23, 25, 35 и 37-й гармоник в высоковольтной системе электроснабжения клетевой ПУ:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{(I)} = 5 \cdot 10^{-12} \cdot t^6 - 6 \cdot 10^{-9} \cdot t^5 + 3 \cdot 10^{-6} \cdot t^4 - 0,0007 \cdot t^3 + 0,0936 \cdot t^2 - 5,6211 \cdot t + 255,5; \\ I_{II} = 3 \cdot 10^{-13} \cdot t^6 - 4 \cdot 10^{-10} \cdot t^5 + 2 \cdot 10^{-7} \cdot t^4 - 4 \cdot 10^{-5} \cdot t^3 + 0,0045 \cdot t^2 - 0,3409 \cdot t + 18,494; \\ I_{(11)} = 3 \cdot 10^{-13} \cdot t^6 - 3 \cdot 10^{-10} \cdot t^5 + 2 \cdot 10^{-7} \cdot t^4 - 4 \cdot 10^{-5} \cdot t^3 + 0,0043 \cdot t^2 - 0,2889 \cdot t + 13,429; \\ I_{(13)} = 1 \cdot 10^{-13} \cdot t^6 - 2 \cdot 10^{-10} \cdot t^5 + 9 \cdot 10^{-8} \cdot t^4 - 2 \cdot 10^{-5} \cdot t^3 + 0,0033 \cdot t^2 - 0,2162 \cdot t + 7,7496; \\ I_{(23)} = 9 \cdot 10^{-14} \cdot t^6 - 1 \cdot 10^{-10} \cdot t^5 + 5 \cdot 10^{-8} \cdot t^4 - 1 \cdot 10^{-5} \cdot t^3 + 0,0014 \cdot t^2 - 0,1013 \cdot t + 4,8651; \\ I_{(25)} = 3 \cdot 10^{-14} \cdot t^6 - 4 \cdot 10^{-11} \cdot t^5 + 2 \cdot 10^{-8} \cdot t^4 - 4 \cdot 10^{-6} \cdot t^3 + 0,0006 \cdot t^2 - 0,0429 \cdot t + 1,9853; \\ I_{(35)} = 2 \cdot 10^{-14} \cdot t^6 - 2 \cdot 10^{-11} \cdot t^5 + 8 \cdot 10^{-9} \cdot t^4 - 2 \cdot 10^{-6} \cdot t^3 + 0,0004 \cdot t^2 - 0,038 \cdot t + 2,1273; \\ I_{(37)} = 4 \cdot 10^{-14} \cdot t^6 - 4 \cdot 10^{-11} \cdot t^5 + 2 \cdot 10^{-8} \cdot t^4 - 5 \cdot 10^{-6} \cdot t^3 + 0,0006 \cdot t^2 - 0,0387 \cdot t + 1,5552. \end{array} \right. \quad (B.1)$$

**ПРИЛОЖЕНИЕ Г. ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ КЛЕТЕВОЙ
ПОДЪЕМНОЙ УСТАНОВКИ «ФИЛЬТР – ВНЕШНЯЯ СЕТЬ»**

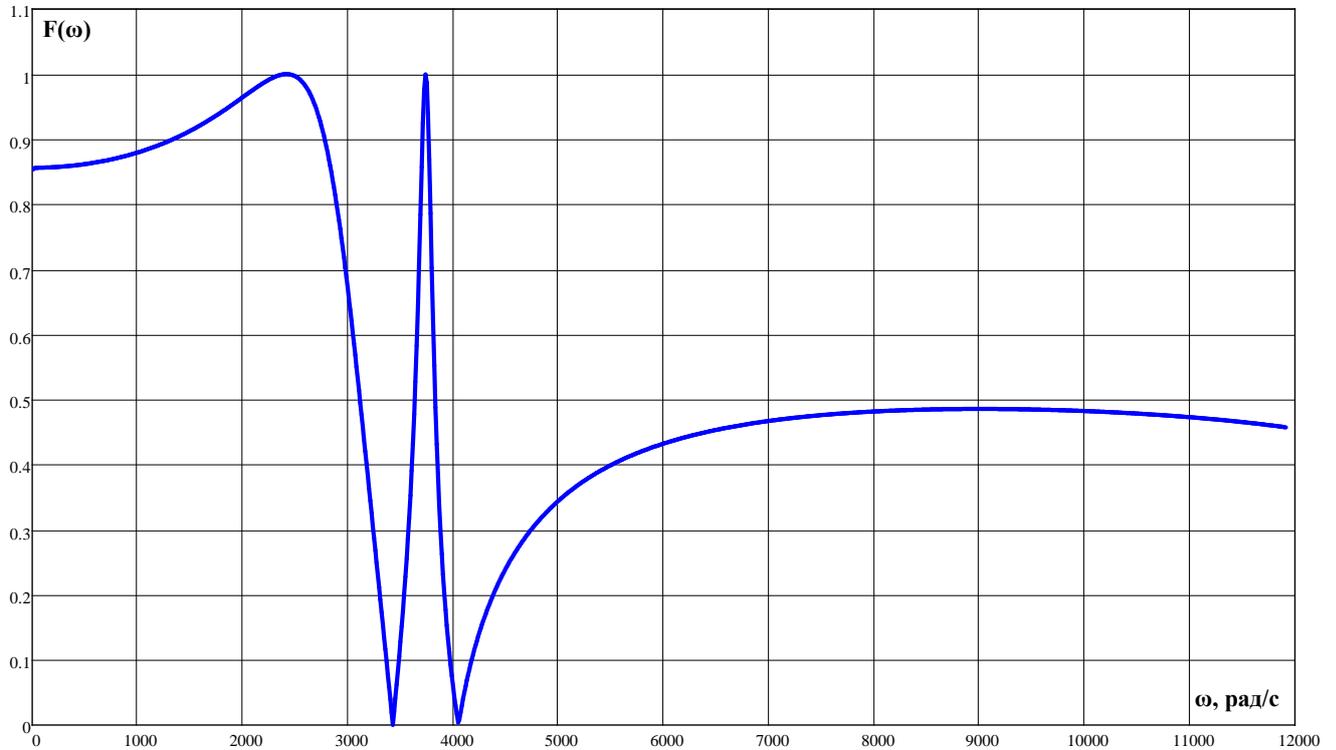


Рисунок Г.1. Частотная характеристика системы электроснабжения клетевой ПУ
«резонансные ПФ – внешняя сеть»

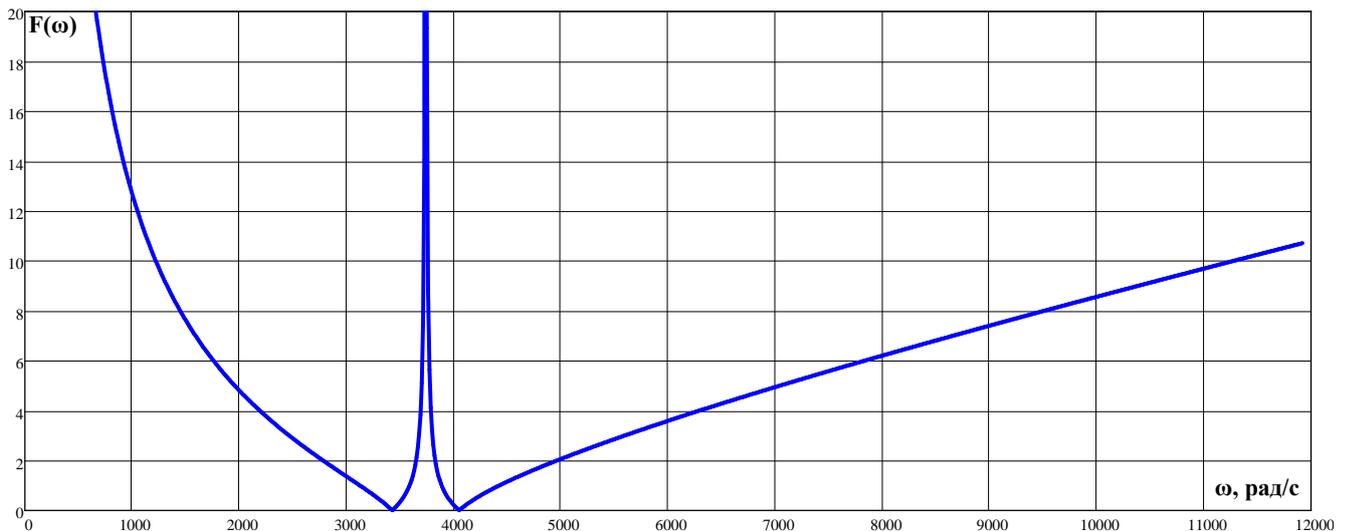


Рисунок Г.2. Частотная характеристика системы электроснабжения клетевой ПУ
«ПФ двойной настройки – внешняя сеть»

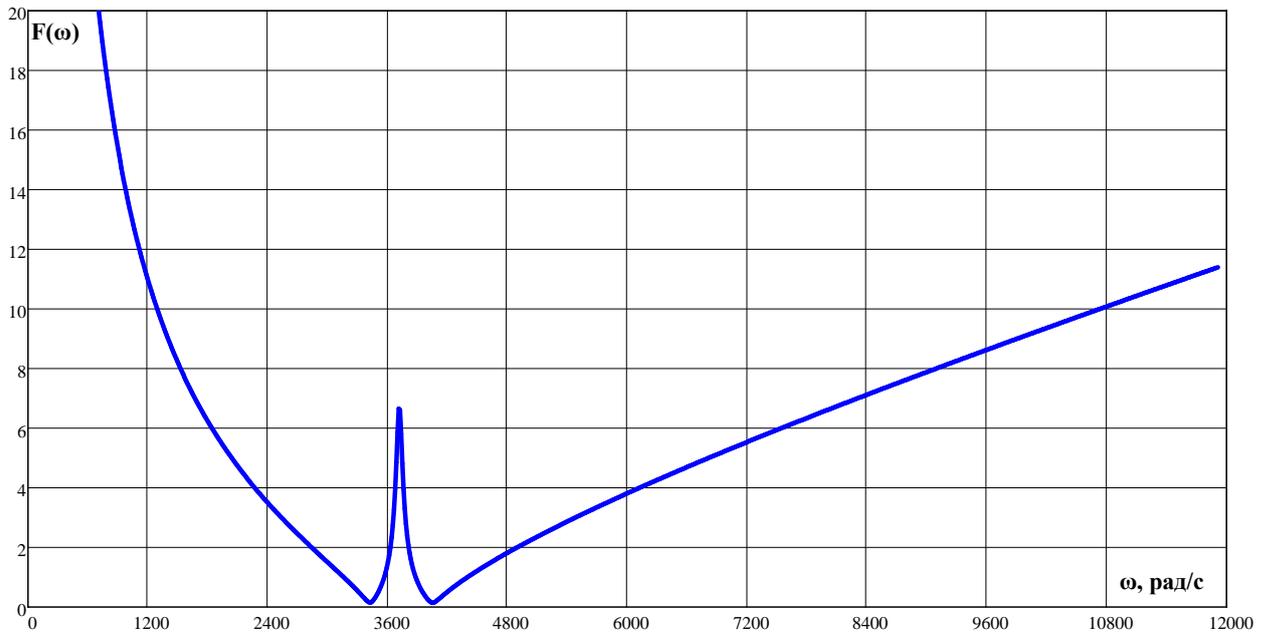


Рисунок Г.3. Частотная характеристика системы электроснабжения клетевой ПУ «ПФ С-типа – внешняя сеть»

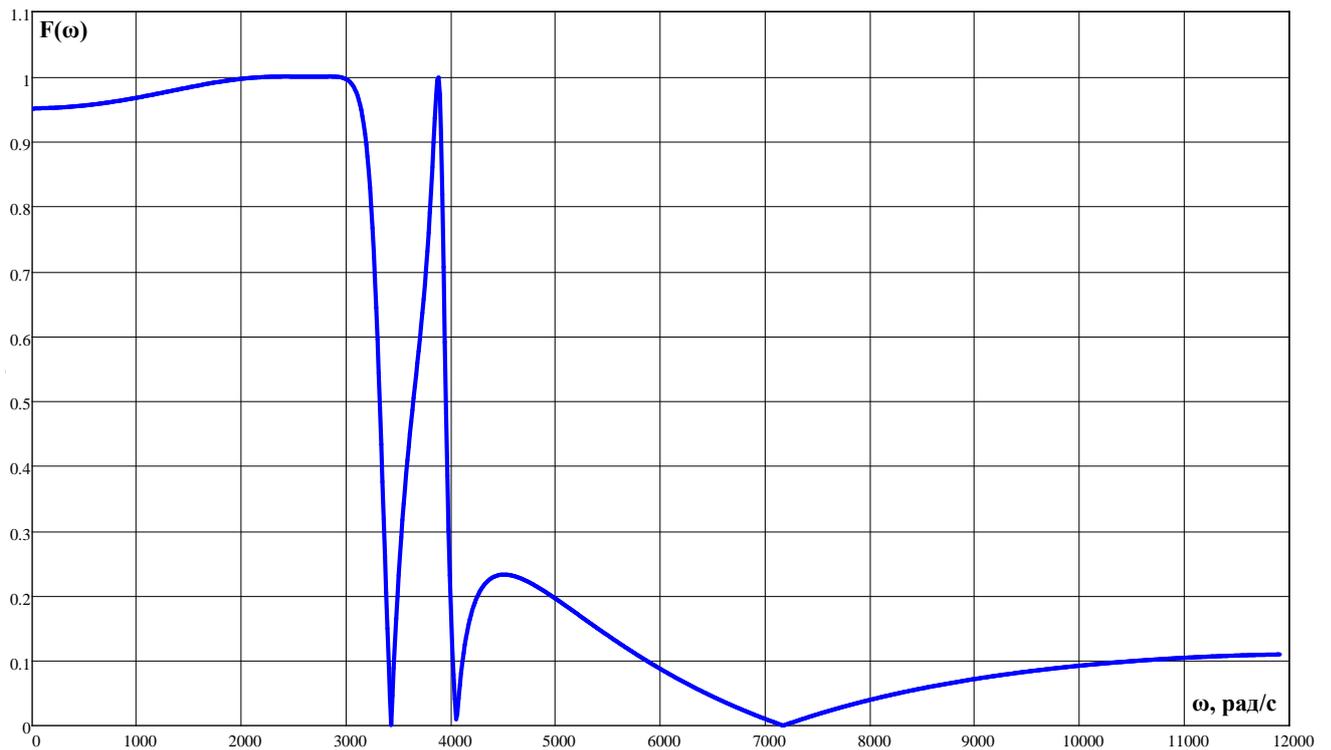


Рисунок Г.4. Частотная характеристика системы электроснабжения клетевой ПУ «комбинированный ПФ – внешняя сеть»

ПРИЛОЖЕНИЕ Д. ДОКУМЕНТЫ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе
ФГБОУ ВО «Белгородский государственный
технологический университет им. В.Г. Шухова»

Евтушенко Е.И.

14 сентября 2018 г.

АКТ

внедрения в учебный процесс кафедры «Электроэнергетика и автоматика»
ФГБОУ ВО БГТУ им. В.Г. Шухова результатов диссертационной работы
Прасола Дмитрия Александровича на тему «Электромагнитная совместимость в
высоковольтных рудничных сетях с мощными тиристорными электроприводами
постоянного тока»

Результаты диссертационного исследования Прасола Д.А., а именно:

- методика анализа электромагнитной обстановки в высоковольтных рудничных сетях с мощными тиристорными электроприводами на основании экспериментальных, имитационных и теоретических исследований;
 - методика идентификации параметров и определения вероятностных характеристик случайных процессов изменения нагрузок в высоковольтных рудничных системах электроснабжения с целью выявления наиболее вероятного диапазона значений токов нагрузки и токов искажения;
 - способ компенсации высших гармоник токов и напряжений в высоковольтной рудничной сети, основанный на выборе рациональной конструкции ФКУ на основании решения многокритериальной задачи оптимизации методами нечеткой логики;
- внедрены в учебный процесс кафедры «Электроэнергетика и автоматика» и используются при проведении лекционных, лабораторных и практических занятий при подготовке магистров по направлению 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» в рамках дисциплин «Качество электрической энергии» и «Электромагнитная совместимость в системах электроснабжения».

Профессор кафедры
«Электроэнергетика и автоматика»



Авербух М.А.

Заведующий кафедрой
«Электроэнергетика и автоматика»



Белоусов А.В.