

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МАГНИТОГОРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Г.И. НОСОВА»

На правах рукописи



Афанасьев Максим Юрьевич

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ
МОЩНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С АКТИВНЫМИ
ВЫПРЯМИТЕЛЯМИ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ПАССИВНЫХ ФИЛЬТРОВ**

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Специальность 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Николаев Александр Аркадьевич

Магнитогорск - 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. ПРОБЛЕМА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ МОЩНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ НА БАЗЕ ПЧ-АВ ВО ВНУТРИЗАВОДСКИХ СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ.....	14
1.1. Существующие схемы питания и силовые схемы мощных электроприводов с АВ.....	16
1.2. Анализ существующих конфигураций систем внутризаводского электрообеспечения различных металлургических предприятий.....	23
1.3. Анализ существующих способов улучшения качества напряжения внутризаводских распределительных сетей 6-35 кВ с мощными электроприводами на базе ПЧ-АВ.....	26
1.3.1. Применение адаптивных алгоритмов ШИМ для улучшения ЭМС ПЧ-АВ с внутризаводской распределительной сетью.....	27
1.3.2. Использование специальных схем электрообеспечения с использованием «грязной» секции для независимого питания силовых преобразователей и применение L-C-L фильтров на входе ПЧ-АВ.....	33
1.3.3. Применение традиционных фильтрокомпенсирующих устройств для улучшения ЭМС ПЧ-АВ с внутризаводской распределительной сетью.....	38
1.4. Выводы по главе.....	50
ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИСТЕМЕ ВНУТРИЗАВОДСКОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ 10 КВ АО «МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ ЗАВОД БАЛАКОВО» С МОЩНЫМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ НА БАЗЕ ПЧ-АВ.....	53
2.1. Анализ структуры системы электрообеспечения электроприемников 10 кВ АО «Металлургический завод Балаково».....	53

2.2. Исследование силовой схемы и алгоритмов функционирования ШИМ активных выпрямителей преобразователей ТМЕИС TMdrive-70	59
2.3. Обработка результатов экспериментальных исследований показателей качества электроэнергии в сети 10 кВ внутризаводского электроснабжения завода	63
2.4. Экспериментальное определение частотной характеристики сети 10 кВ	82
2.5 Выводы по главе	86
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ АО «МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ ЗАВОД БАЛАКОВО» И ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ КЛЕТЕЙ СОРТОВОГО СТАНА НА БАЗЕ ПЧ-АВ	88
3.1. Анализ конфигурации электроснабжения электроприемников 10 кВ металлургического завода АО «Металлургический завод Балаково»	88
3.2 Разработка имитационной модели системы внутризаводского электроснабжения АО «Металлургический завод Балаково» с ПЧ-АВ	89
3.3. Разработка имитационной модели ПЧ-АВ ТМЕИС с ШИМ Fixed Pulse Pattern Control в составе электропривода скоростных проволочных блоков	99
3.4. Проверка адекватности комплексной имитационной модели системы внутризаводского электроснабжения АО «Металлургический завод Балаково» с ПЧ-АВ	112
3.5. Выводы по главе	116
ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА НОВОГО СПОСОБА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ПЧ-АВ С ПИТАЮЩЕЙ СЕТЬЮ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ПАССИВНОГО ФИЛЬТРА	118
4.1. Разработка и применение СПФ для коррекции частотной характеристики распределительной сети 10 кВ металлургического завода АО «Металлургический завод Балаково»	118

4.2. Разработка методики расчета параметров СПФ	124
4.2.1. Определение места установки СПФ во внутривоздушной СЭС	124
4.2.2. Определение номинальной мощности, эквивалентной емкости конденсаторов и индуктивности воздушного реактора СПФ	129
4.2.3. Анализ суммарного коэффициента гармонических искажений тока конденсаторных батарей в СПФ	134
4.2.4. Анализ величины броска тока и перенапряжения при включении СПФ...	137
4.3. Уточненный анализ эффективности применения СПФ с использованием комплексной имитационной модели СЭС АО «Металлургический завод Балаково»	141
4.4. Выводы по главе	152
ГЛАВА 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СПФ В СЭС АО «МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ ЗАВОД БАЛАКОВО»	154
5.1. Технические данные реализованного СПФ на металлургическом заводе АО «Металлургический завод Балаково»	154
5.2. Экспериментальные исследования эффективности разработанного СПФ на металлургическом заводе АО «Металлургический завод Балаково»	161
5.3 Выводы по главе	172
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	174
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	176
ПРИЛОЖЕНИЕ А	193
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	200
ПРИЛОЖЕНИЕ В	202

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Технический прогресс в области автоматизированного электропривода (АЭП) характеризуется непрерывным совершенствованием его элементной базы в направлении роста мощности силовых полупроводниковых преобразователей и снижения мощности элементов их управления при резком увеличении динамических свойств элементов. В этих условиях заметно обострилась проблема электромагнитной совместимости (ЭМС) элементов АЭП с питающей сетью. Здесь необходимо отметить, что в последние годы в металлургической отрасли наблюдается тенденция строительства мини-заводов производительностью в 1 – 2 млн тонн стали в год. Передовыми кампаниями, осуществляющими проектирование и строительство данных заводов, являются Danieli, SMS Semag, Primetals, WISDRI, Sinosteel. Основными достоинствами являются: объединение сверхкомпактных размеров и высоких технологий с пониженными инвестиционными расходами, исключительно низкой стоимостью трансформации, а также высокой экологической чистотой. Именно поэтому спрос на строительство мини-заводов растет. В системах внутривзаводского электроснабжения металлургических мини-заводов с производством стали на уровне 1-2 миллионов тонн в год используются протяженные электрические сети с уровнем напряжения от 6 до 35 кВ. При большой длине кабельных линий суммарная емкость кабелей может быть значительной, достигая нескольких микрофарад. Важно отметить, что современные преобразователи частоты (ПЧ) с активными выпрямителями (АВ) с применением широтно-импульсной модуляции (ШИМ) генерируют высокочастотные гармоники напряжения и тока с номерами выше 40-й. В результате взаимодействия индуктивностей сетевых трансформаторов и емкостей кабельных линий возникают резонансные явления в частотной характеристике сети, которые могут усилиться при наличии высокочастотных гармоник в сети, создаваемых современными ПЧ-АВ, вследствие чего происходят сильные искажения напряжения на общих секциях распределительных устройств (РУ). Из-за ухудшения качества напряжения на

секциях РУ возможны аварийные ситуации, связанные с отключением и выходом из строя чувствительных электроприемников, таких как: источники бесперебойного питания в серверных, питающие промышленные программируемые контроллеры и другие ПЧ.

Существующие способы борьбы с резонансными явлениями в электрических сетях среднего напряжения, в которых присутствуют нелинейные приемники, такие как мощные привода прокатных станков с ПЧ-АВ, применяемые в системах электроснабжения металлургических предприятий, не всегда позволяют изменить ситуацию в лучшую сторону. Одним из способов решения данной проблемы является применение классических традиционных фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ). Зачастую применение традиционных ФКУ для устранения сильных искажений напряжения на секциях 6-35 кВ не оказывает должного эффекта. Установка таких ФКУ сопровождается дополнительными паразитными резонансами тока, которые усиливают промежуточные гармоники. Данные гармоники многократно усиливают колебания и сильно искажают форму напряжения при наложении частотной характеристики распределительной сети с областью высокочастотных гармоник, генерируемых современными ПЧ-АВ.

В связи с этим актуальной задачей является разработка нового способа обеспечения ЭМС мощных ПЧ-АВ в условиях наличия резонансов токов в частотной характеристике питающей сети за счет применения специализированного корректирующего фильтра для обеспечения сдвига резонансов токов в безопасную область частотной характеристики сети 10 кВ, где отсутствуют значимые гармоники силовых преобразователей.

Степень разработанности. В научных исследованиях А.А. Николаева, А.С. Маклакова, М.В. Буланова, И.Г. Гилемова, С.В. Брованова, О.В. Крюкова, О.И. Осипова, Ю.М. Быкова, И.Л. Коляндра, Б.Е. Калашникова, А. А. Moeini, J. R. Rodriguez, J. Pontt, G. Kolap, Y. Wang и др. рассматривались вопросы, исследования и способы решения проблемы внутрисистемной ЭМС электроприводов прокатных станков. Как следует из обзора данных источников, задача эффективного применения различных способов, позволяющих устранять резонансные явления в

СЭС, содержащих в себе электроприводы с ПЧ-АВ, а также обеспечивающих ЭМС элементов АЭП, оказывается весьма сложной. Существующие и перспективные способы ЭМС в условиях резонансных явлений в сетях 6-35 кВ за счет коррекции систем управления АВ алгоритмов ШИМ, не всегда возможно реализовать на практике из-за закрытых систем управления АВ и ограничения по нагреву тиристорных ключей при увеличении частоты коммутации и числа удаляемых либо ослабляемых гармоник (диссертационные работы Буланова М.В, Гилемова И.Г.). При этом альтернативные способы обеспечения ЭМС за счет применения фильтрокомпенсирующих устройств должным образом не рассмотрены.

Объектом исследования в работе являются системы внутриводского электроснабжения (ЭС) металлургических заводов с малым производством, включающие в себя протяженные кабельные линии электропередач и мощные электроприводы прокатных станов, выполненные на базе ПЧ-АВ.

Предмет исследования – специализированный пассивный фильтр, обеспечивающий изменение частотной характеристики питающей сети и сдвиг опасных резонансов в безопасную зону, и электроприводы прокатных станов на базе ПЧ-АВ, ухудшающие качество электроэнергии за счет генерирования высших гармоник на входе АВ.

Цель работы - улучшение ЭМС ПЧ-АВ в составе электроприводов клеток прокатных станов с распределительными сетями 6-35 кВ СЭС металлургических заводов при наличии резонансных явлений за счет использования специализированных пассивных фильтров (СПФ).

Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

1. Сравнительный анализ структуры системы электроснабжения электроприемников 10 кВ компактных и крупных металлургических предприятий с протяженными кабельными линиями электропередач. Исследование резонансных явлений в сетях 6-35 кВ.

2. Исследование показателей качества электроэнергии (ПКЭ) в сетях 10 кВ, гармонического состава токов и напряжений ПЧ-АВ при использовании различных силовых схем АВ и разных алгоритмов ШИМ АВ.

3. Разработка комплексной имитационной модели внутривозводской распределительной сети 10 кВ и ПЧ-АВ для исследования эффективности применения СПФ.

4. Разработка и исследование технических решений по коррекции частотной характеристики сети (ЧХС) с целью исключения опасных областей резонансов, совпадающих с высокочастотными гармониками мощных ПЧ-АВ, за счет специализированных пассивных фильтров.

5. Разработка новой методики расчета параметров специализированного пассивного фильтра.

6. Проведение экспериментальных исследований эффективности функционирования СПФ в условиях действующего производства.

Решение поставленных задач выполнялось на базе электроприводов сортового стана металлургического предприятия АО «Металлургический завод Балаково». Содержание диссертационной работы соответствует решению поставленных задач и изложено следующим образом:

В первой главе рассмотрены существующие схемы питания и силовые схемы современных автоматизированных электроприводов промышленных механизмов на базе ПЧ-АВ. Проведен анализ существующих конфигураций систем внутривозводского электроснабжения различных металлургических предприятий. Выполнен анализ существующих способов обеспечения ЭМС электроприводов на базе ПЧ-АВ в условиях наличия резонансных явлений в частотной характеристике питающей сети 6-35 кВ.

Во второй главе приведены результаты экспериментальных исследований показателей качества электроэнергии в системе внутривозводского электроснабжения 10 кВ АО «Металлургический завод Балаково» при различных схемах электроснабжения и режимах работы электроприводов сортового стана. Проведен анализ резонансных явлений сети 10 кВ, а также исследовано влияние работы ПЧ-АВ ТМЕИС скоростных проволочных блоков сортового цеха на качество электроэнергии в точке общего подключения электроприемников. Выполнено экспериментальное определение частотной характеристики сети 10 кВ.

В третьей главе представлено описание разработанной имитационной модели системы внутризаводского электроснабжения АО «Металлургический завод Балаково». Исследован алгоритм ШИМ, применяемый в ПЧ ТМЕИС TMdrive-70. В рамках комплексной имитационной модели разработаны модели распределительной сети ЗРУ-10 кВ района ГПП и модель ПЧ-АВ ТМЕИС с ШИМ Fixed Pulse Pattern Control в составе электропривода скоростного проволочного блока. Проведена проверка адекватности комплексной имитационной модели при различных схемах электроснабжения и режимах работы электроприводов сортового стана.

В четвёртой главе с помощью имитационной модели произведена разработка нового способа обеспечения ЭМС за счет применения специализированного пассивного фильтра. Для этого была выполнена новая методика определения основных параметров СПФ, вследствие чего данное устройство стало обеспечивать сдвиг опасного параллельного резонанса высокочастотной области частотной характеристики сети 6-35 кВ в безопасную зону, где отсутствует наложение высокочастотных гармоник ПЧ-АВ. Проведен анализ эффективности применения СПФ на имитационной модели металлургического завода АО «Металлургический завод Балаково».

В пятой главе приведена оценка эффективности разработанной методики определения параметров и применения СПФ в СЭС металлургического завода АО «Металлургический завод Балаково». Приведены технические данные реализованного СПФ на действующем металлургическом заводе. Проведен экспериментальный анализ ПКЭ в распределительной сети 10 кВ района ГПП при использовании дополнительных СПФ. Проведен анализ технического эффекта от применения новых СПФ.

В заключении приводятся основные выводы по совокупности результатов, достигнутых в ходе выполнения диссертационной работы.

Научная новизна:

1. Разработан новый способ обеспечения ЭМС мощных электроприводов с ПЧ-АВ, отличающийся от известных тем, что для улучшения показателей

качества электроэнергии во внутривзаводской распределительной сети среднего напряжения осуществляется сдвиг частоты резонанса тока в частотной характеристике питающей сети в безопасную область, где отсутствует наложение высокочастотных гармоник ПЧ-АВ, за счет применения СПФ;

2. Разработана новая методика выбора параметров СПФ, учитывающая резонансные явления в питающей сети и позволяющая определить оптимальные параметры СПФ, обеспечивающие наилучшее качество напряжения в точке общего присоединения заводских электроприемников;

3. Разработана усовершенствованная имитационная модель системы распределительной сети 10 кВ системы электроснабжения металлургического завода с электроприводами сортового стана на базе ПЧ-АВ, позволяющая выполнять анализ режимов работы СПФ;

4. Получены результаты экспериментальных исследований ПКЭ в сети 10 кВ с мощными ЭП на базе ПЧ-АВ, доказывающие эффективность предложенных решений по обеспечению ЭМС ПЧ-АВ с питающей сетью за счет использования СПФ.

Практическая значимость и реализация работы. Практическая значимость результатов диссертационной работы заключается в улучшении показателей качества электроэнергии во внутривзаводских распределительных сетях среднего напряжения с мощными электроприводами на базе ПЧ-АВ за счет применения СПФ. Внедрение результатов работы обеспечивает улучшение показателей качества электроэнергии на общих секциях заводской подстанции и, как следствие, уменьшение аварийных ситуаций, связанных с выходом из строя чувствительных к качеству электроэнергии электроприемников. Результаты диссертационной работы внедрены на металлургическом заводе АО «Металлургический завод Балаково». Количественный показатель технического эффекта по изменению уровня суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения K_U составляет: 1) без применения СПФ – $K_U = 10,26 \%$; 2) при использовании СПФ – $K_U = 2,14 \%$ (уменьшение значения K_U в 4,79 раз).

Методика проведения исследований. В представленной диссертационной работе применялись широко известные методы имитационного моделирования распределительных сетей СЭС металлургических заводов и систем автоматизированного ЭП на базе ПЧ-АВ, которые базируются на основных принципах теории автоматического управления и теории электрических цепей. При изучении причин возникновения резонансных явлений использовались экспериментальные данные, полученные в ходе проведения научно-исследовательской работы на металлургическом заводе АО «Металлургический завод Балаково». Для обработки экспериментальных данных использовались методы имитационного моделирования в программе Matlab при помощи приложения Simulink.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

1. Новый способ обеспечения ЭМС мощных ПЧ-АВ с питающей сетью с резонансными явлениями, за счет сдвига параллельного резонанса тока в ЧХС в безопасную зону, где нет значимых гармоник, генерируемых ПЧ-АВ, путем применения в распределительных сетях 6-35 кВ СПФ.
2. Новая методика выбора мощности и расчета параметров СПФ, предназначенного для коррекции частотной характеристики питающей сети.
3. Усовершенствованная имитационная модель СЭС металлургического завода с СПФ и ЭП на базе ПЧ-АВ, позволяющая выполнять анализ режимов работы СПФ.
4. Результаты экспериментальных исследований, показывающие эффективность применения СПФ для обеспечения ЭМС мощных ЭП с ПЧ-АВ.

Достоверность полученных результатов, выводов и рекомендаций основывается на тщательном анализе и детальной обработке экспериментальных данных, полученных в ходе исследований на реальном действующем металлургическом заводе «АО Металлургический завод Балаково». Подтверждается корректным применением имитационных методов моделирования и основывается на результатах экспериментов, проведенных на металлургическом

заводе. Кроме того, выводы и рекомендации соответствуют результатам, опубликованным в научной литературе.

Соответствие диссертации паспорту специальности. Диссертация соответствует следующим пунктам паспорта специальности 2.4.2.

Электротехнические комплексы и системы:

1) п. 1 - «Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, анализ системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем, включая электромеханические, электромагнитные преобразователи энергии и электрические аппараты, системы электропривода, электроснабжения и электрооборудования»;

2) п. 3 – «Разработка, структурный и параметрический синтез, оптимизация электротехнических комплексов, систем и их компонентов, разработка алгоритмов эффективного управления»;

3) п. 4 – «Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов, систем и их компонентов в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях, диагностика электротехнических комплексов».

Апробация результатов диссертационной работы. Положения и основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных научно-технических конференциях: 2020 Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI-2020) (г. Магнитогорск, 2020); 2021 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon-2021) (г. Магнитогорск, 2021); 2022 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon-2022) (г. Магнитогорск, 2022); 2023 International Russian Automation Conference (RusAutoCon-2023) (г. Сочи, 2023); 76 – 81 международных научно-технических конференциях «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» («Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск 2018 – 2022 г.).

В 2022-2023 гг. исследования проводились в рамках гранта РФФ (научный проект №22-19-20069).

Результаты диссертационной работы внедрены на металлургическом предприятии АО «Металлургический завод Балаково».

Публикации. Результаты диссертационной работы опубликованы в **14** научных трудах, включая **3** научные статьи из перечня ВАК РФ, **5** научных статей в изданиях, индексируемых в базе Scopus. Опубликована научная монография и получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

ГЛАВА 1. ПРОБЛЕМА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ МОЩНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ НА БАЗЕ ПЧ-АВ ВО ВНУТРИЗАВОДСКИХ СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

На сегодняшний день в промышленности широкое распространение получили системы электроприводов на базе ПЧ-АВ. Данные системы при модернизации промышленных производств вытесняют традиционные преобразователи с тиристорными и диодными выпрямителями. ПЧ-АВ обладают следующими преимуществами: возможностью рекуперации энергии в питающую сеть; возможностью работы с заданным коэффициентом мощности [1-4]. Производителями ПЧ-АВ также заявляется о лучшей ЭМС ПЧ-АВ с питающей сетью. Лучшая ЭМС должна достигаться за счет многоуровневой топологии ПЧ-АВ, а также за счет применения специальных алгоритмов широтно-импульсной модуляции (ШИМ) АВ. Эти преимущества привели к широкомасштабному внедрению мощных электроприводов на основе ПЧ-АВ на промышленных предприятиях [5].

Однако опыт эксплуатации мощных электроприводов среднего напряжения с ПЧ-АВ во внутризаводских распределительных сетях 6-35 кВ с нелинейной частотной характеристикой, обусловленной резонансными явлениями, опровергает заявления производителей ПЧ-АВ [6, 7]. Резонансные явления в сетях 6-35 кВ вызываются взаимодействием индуктивности элементов системы электроснабжения (трансформаторы, токоограничивающие реакторы) с ёмкостью отходящих кабельных линий. Если частота резонанса при достаточной амплитуде совпадет с частотой гармоник тока, потребляемого ПЧ-АВ, в распределительной сети будут наблюдаться высокочастотные искажения напряжения. Это может привести к сбоям в работе чувствительных к качеству напряжения электроприемников. Данная проблема неоднократно наблюдалась на различных металлургических предприятиях таких, как АО «Металлургический завод Балаково», АО «Абинский электрометаллургический завод», Череповецкий

металлургический комбинат ЧерМК ПАО «Северсталь», ЗАО «ММК Metalurji», г. Искендерун, Турция и другие [1].

Как показали анализ научно-технической литературы [8-11], а также результаты исследований, ведущие фирмы-производители ПЧ-АВ в большинстве случаев не осуществляют качественную реализацию технических мероприятий по обеспечению электромагнитной совместимости мощных электроприводов на базе ПЧ-АВ с внутриводской сетью среднего напряжения [12-14]. Использование специализированных алгоритмов ШИМ с удалением или подавлением выделенных гармоник (алгоритмы PWM Selective Harmonic Elimination PWM и Selective Harmonic Mitigation PWM) не всегда обеспечивает необходимый технический эффект по обеспечению заданного качества напряжения на общих секциях ГПП из-за отсутствия функции адаптации данных алгоритмов к резонансным явлениям в питающей сети 6-35 кВ. Также необходимо отметить, что входные сетевые фильтры в составе ПЧ-АВ, а также классические узкополосные фильтры высших гармоник, устанавливаемые в системе электроснабжения мощных электроприводов на базе ПЧ-АВ, не обеспечивают полного исключения негативного влияния ПЧ-АВ на качество напряжения в питающей сети из-за сложности резонансных явлений, заключающейся в наличии нескольких резонансных максимумов в различных областях частотной характеристики.

Следует отметить, что часто производители преобразовательной техники в рекламных целях указывают информацию о гармоническом составе токов и напряжений ПЧ-АВ только до гармоник с номерами 40-50. С одной стороны, это объясняется установленными нормативными документами пределами. С другой стороны, ПЧ-АВ генерирует гармоники более высокого порядка, чем указанные в стандартах, регламентирующих качество электрической энергии. Замалчивание производителями информации о реальном гармоническом составе токов и напряжений ПЧ-АВ не позволяет принять нужные технические решения для обеспечения ЭМС на стадии проектирования электроприводов с ПЧ-АВ. Это, в свою очередь, приводит к описанным выше проблемам.

1.1. Существующие схемы питания и силовые схемы мощных электроприводов с АВ

На сегодняшний день промышленные электроприводы большой мощности, например, главные электроприводы прокатных станов выполняются на базе высоковольтных трехуровневых преобразователей частоты с активными выпрямителями (АВ) и автономными инверторами напряжения (АИН) и синхронными (асинхронными) электродвигателями [15, 16].

Силовая схема АВ и АИН выполнена на полностью управляемых полупроводниковых вентилях (IGCT - тиристорах или IGBT - транзисторах). Активный выпрямитель имеет полностью идентичную структуру, что и АИН. Каждое плечо преобразователя состоит из четырех управляемых ключей (рисунок 1.1) с подключенными параллельными диодами и соединительными диодами. Соединительные диоды необходимы для того, чтобы соединять шесть средних силовых модулей к нулевой точке преобразователя. Диоды подключены к звену постоянного тока, которое представлено в виде двух эквивалентных емкостей, соединенных последовательно. Напряжение на одном конденсаторе составляет половину напряжения в звене постоянного тока. Точка между конденсаторами образует нулевой потенциал преобразователя [15, 16, 17].

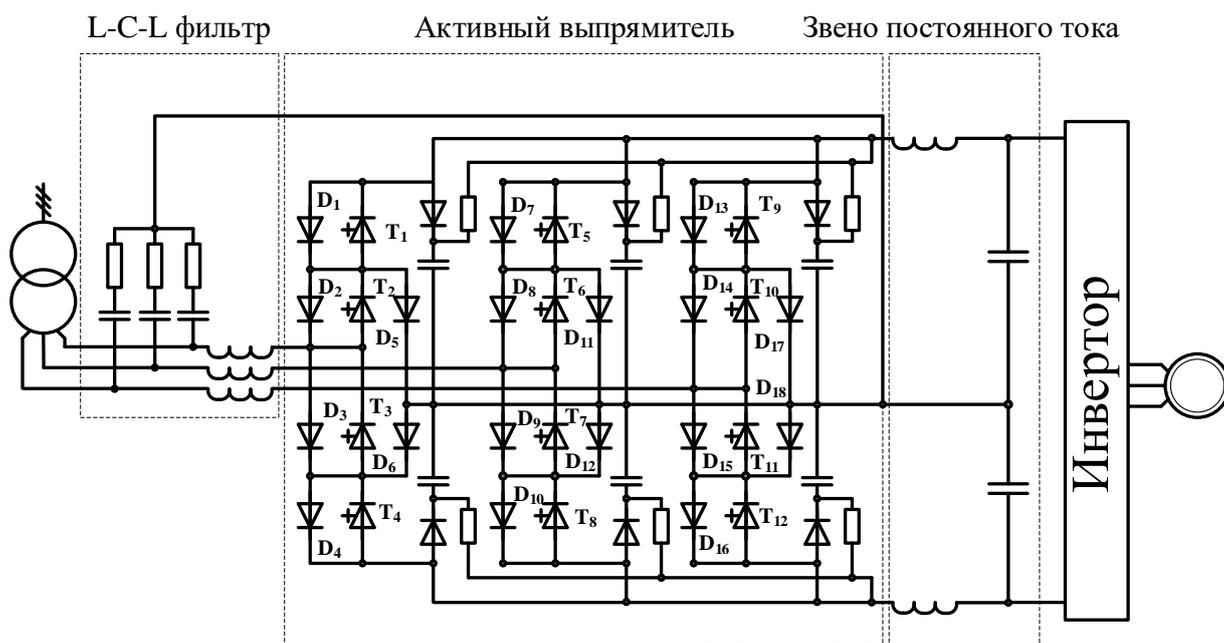


Рисунок 1.1 - Упрощенная схема ПЧ-АВ

Принцип действия трехуровневого АВ рассмотрим на примере фазы А ПЧ-АВ, изображенного на рисунке 1.1. Напряжение на входе АВ формируется в виде набора прямоугольных импульсов, положительной и отрицательной полярности. Формирование напряжения происходит следующим образом. В первый интервал времени для того чтобы получить на выходе 0 включаются тиристоры Т2 и Т3. В зависимости от направления тока в нагрузке L будут работать диод D5 и тиристор Т3. Во второй период времени закрывается тиристор Т3, и открывается тиристор Т1, таким образом, на выходе получается напряжение $+U_{DC}/2$. В третий период времени тиристор Т3 открывается, а тиристор Т1 закрывается. В четвертый, пятый, шестой и седьмой периоды времени переключения происходят аналогичным образом. В восьмой период времени закрывается тиристор Т2 и открывается тиристор Т4, и на выходе получается напряжение $-U_{DC}/2$. Все остальные переключения происходят аналогично. Таким образом, из четырех ключей в каждом плече моста одновременно могут быть включены только два, которые присоединяют звено постоянного тока к нагрузке в трех точках «+», «0», «-». Эти соединения образуют три возможных состояния в каждом плече моста: P - подключение к положительному полюсу звена постоянного тока, N - подключение к нейтральному полюсу звена постоянного тока, O - подключение к отрицательному полюсу звена постоянного тока [15, 16, 17].

Активный выпрямитель инвертирует постоянное напряжение фильтрового конденсатора в импульсное напряжение на своих зажимах переменного тока. Эти зажимы связаны с питающей сетью через буферные реакторы L (рисунок 1.1). В отличие от регулируемой рабочей частоты напряжения на зажимах переменного тока АИН, рабочая частота напряжения на зажимах переменного тока АВ постоянна и равна частоте питающей сети. Разность мгновенных значений синусоидального напряжения питающей сети и импульсного напряжения на зажимах переменного тока АВ воспринимаются реакторами L (рисунок 1.1). Благодаря использованию режима ШИМ импульсное напряжение, формируемое АВ на стороне переменного тока, имеет благоприятный гармонический состав, в котором основная гармоника и высшие гармоники существенно различаются по

частоте. Это создает благоприятные условия для фильтрации высших гармоник тока, потребляемого из питающей сети, реакторами L . АВ преобразует потребляемый из сети переменный, близкий к синусоидальному, в пульсирующий выходной ток, содержащий переменную и постоянную составляющие. Переменная составляющая замыкается через конденсаторы, которые ограничивают пульсации напряжения в звене постоянного тока от переменной составляющей выходного тока АВ. Конденсаторы выполняют ту же функцию и по отношению к переменной составляющей тока, потребляемого АИН. Постоянная составляющая выходного тока АВ подпитывает конденсаторы, компенсируя расход постоянного тока, отдаваемого во входную цепь АИН.

Фазовый угол потребляемого тока зависит от соотношения амплитуд и фазовых углов напряжений, приложенных к реакторам со стороны сети и со стороны АВ, а также от параметров реактора. Варьируя с помощью системы управления АВ параметрами основной гармоники его переменного напряжения на зажимах переменного тока, можно обеспечить потребление из сети необходимого тока с заданным фазовым углом. Иными словами, можно обеспечить работу преобразователя с заданным значением коэффициента мощности. Поэтому преобразователь частоты с АВ может быть использован в системе электроснабжения либо как нейтральный элемент, либо как источник, либо как потребитель реактивной мощности.

Для подключения ПЧ-АВ к питающей сети используют различные схемы подключения [17]. Для приводов средней мощности используют, как правило, 6-ти пульсную схему выпрямления (рисунок 1.2). Они являются самыми простыми и состоят из одного ПЧ-АВ и силового однообмоточного трансформатора, обмотки которого соединены по схеме звезда/звезда, и фазовый угол сдвига между первичным и вторичным напряжением равен 0. ПЧ-АВ, подключенные по 6-ти пульсной схеме, генерируют в сеть гармоники кратные $6n \pm 1$, где n -целое положительное число. Гармонический состав и форма фазного сетевого тока АВ с 6-ти пульсной схемой питания при использовании ШИМ с удалением выделенных гармоник ($n=5, 7, 11, 13, 17, 19$) приведены на рисунке 1.3.

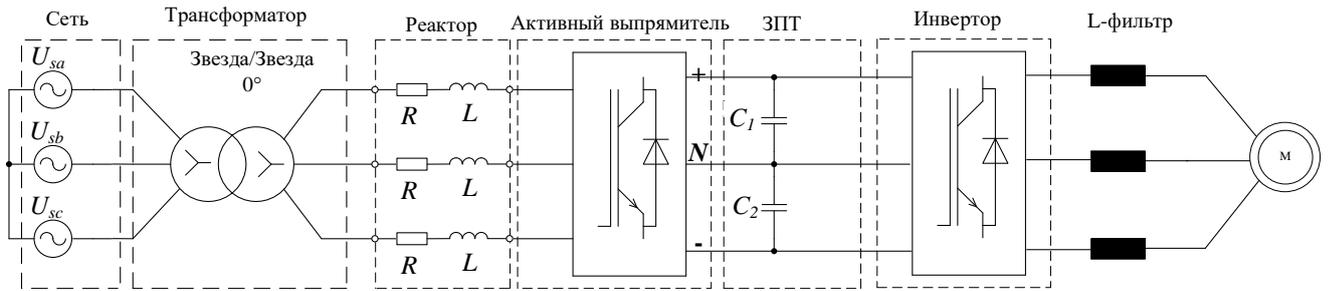


Рисунок 1.2 – 6-ти пульсная схема соединения ПЧ-АВ

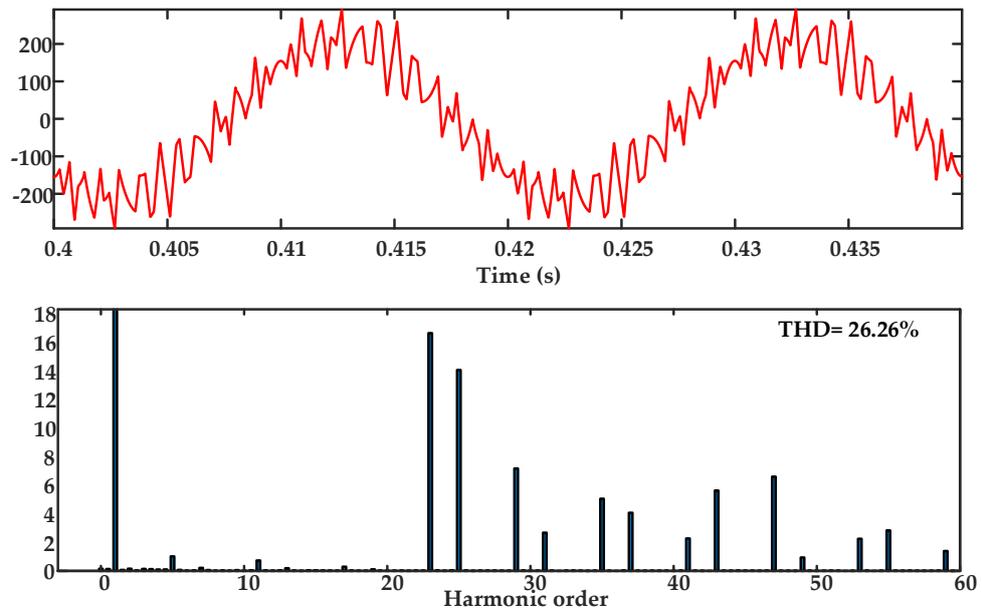


Рисунок 1.3 – Гармонический состав и форма фазного сетевого тока АВ с 6-ти пульсной схемой питания при использовании ШИМ с удалением выделенных гармоник ($n=5, 7, 11, 13, 17$ и 19)

Для электроприводов прокатных станов большой мощности применяются многопульсные схемы выпрямления, как правило, 12-ти пульсные. Для этого параллельно подключаются два ПЧ-АВ, которые имеют общее звено постоянного тока. К питающей сети преобразователи частоты подключаются через согласующие силовые трансформаторы.

Для создания 12-пульсных схемы выпрямления применяются два варианта использования согласующих трансформаторов (рисунок 1.4). Используются два силовых трансформатора с последовательно включенными первичными обмотками. Гармонический состав и форма фазного сетевого тока АВ с 12-ти пульсной схемой питания при использовании ШИМ с удалением выделенных гармоник ($n=5, 7, 11, 13, 23$ и 25) приведены на рисунке 1.5 [17].

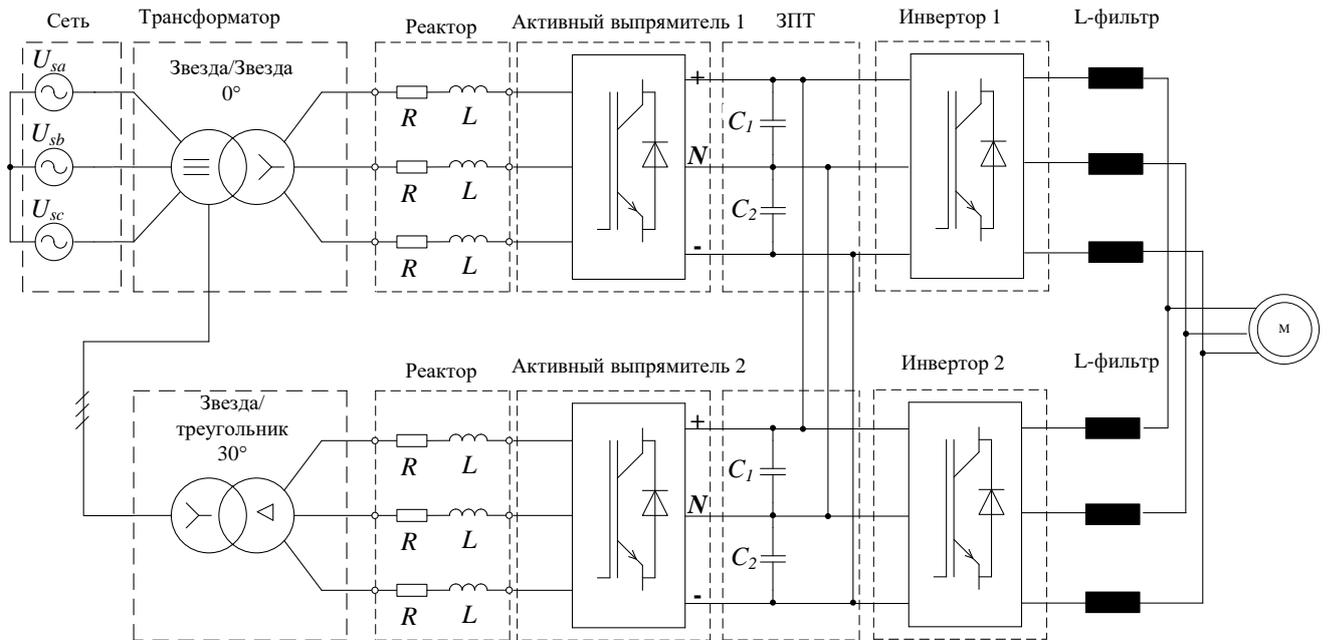


Рисунок 1.4 – 12-ти пульсная схема соединения ПЧ-АВ

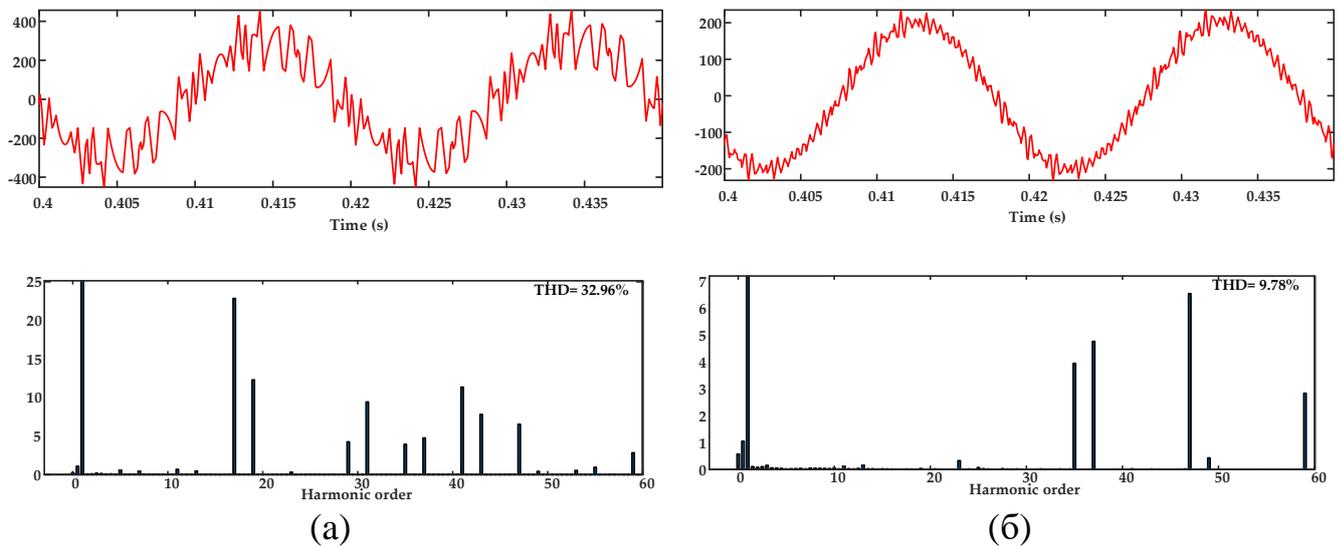


Рисунок 1.5 – Гармонический состав и форма фазного сетевого тока АВ с 12-ти пульсной схемой питания при использовании ШИМ с удалением выделенных гармоник ($n=5, 7, 11, 13, 23$ и 25): (а) сетевой ток отдельного выпрямителя; (б) суммарный сетевой ток

Вторичная обмотка одного трансформатора соединена по схеме «звезда», второго трансформатора - по схеме «треугольник». Благодаря такому соединению обмоток трансформаторов образуется угол сдвига во вторичном напряжении в 30 градусов. В связи с этим в суммарном напряжении на первичной стороне трансформатора отсутствуют гармоники кратные 6-ти. Отсутствие гармоник кратных 6-ти в суммарном напряжении на первичной стороне трансформатора

можно объяснить на примере седьмой гармоники. Напряжение на вторичной стороне трансформаторов по основной гармонике имеют угол сдвига в 30 градусов. Относительно седьмой гармоники этот угол сдвига в семь раз больше и равен 210 градусов. Напряжение фазы В по основной гармонике относительно фазы А имеет угол сдвига в 120 градусов, относительно седьмой гармоники этот угол сдвига составляет $2 \cdot 360^0 + 120^0 = 120^0$. Напряжение на первичной стороне трансформатора Т1 определяется как разность фазных вторичных напряжений с учетом коэффициента трансформации. Напряжение седьмой гармоники на первичной стороне трансформаторов Т1, Т2 находятся в противофазе, вследствие этого происходит взаимокомпенсация друг друга. Данные суждения верны для других гармоник кратных шести (рисунок 1.5) [17].

Еще одним распространённым вариантом подключения ПЧ-АВ к питающей сети, является использование 18-ти пульсовой схемы (рисунок 1.6).

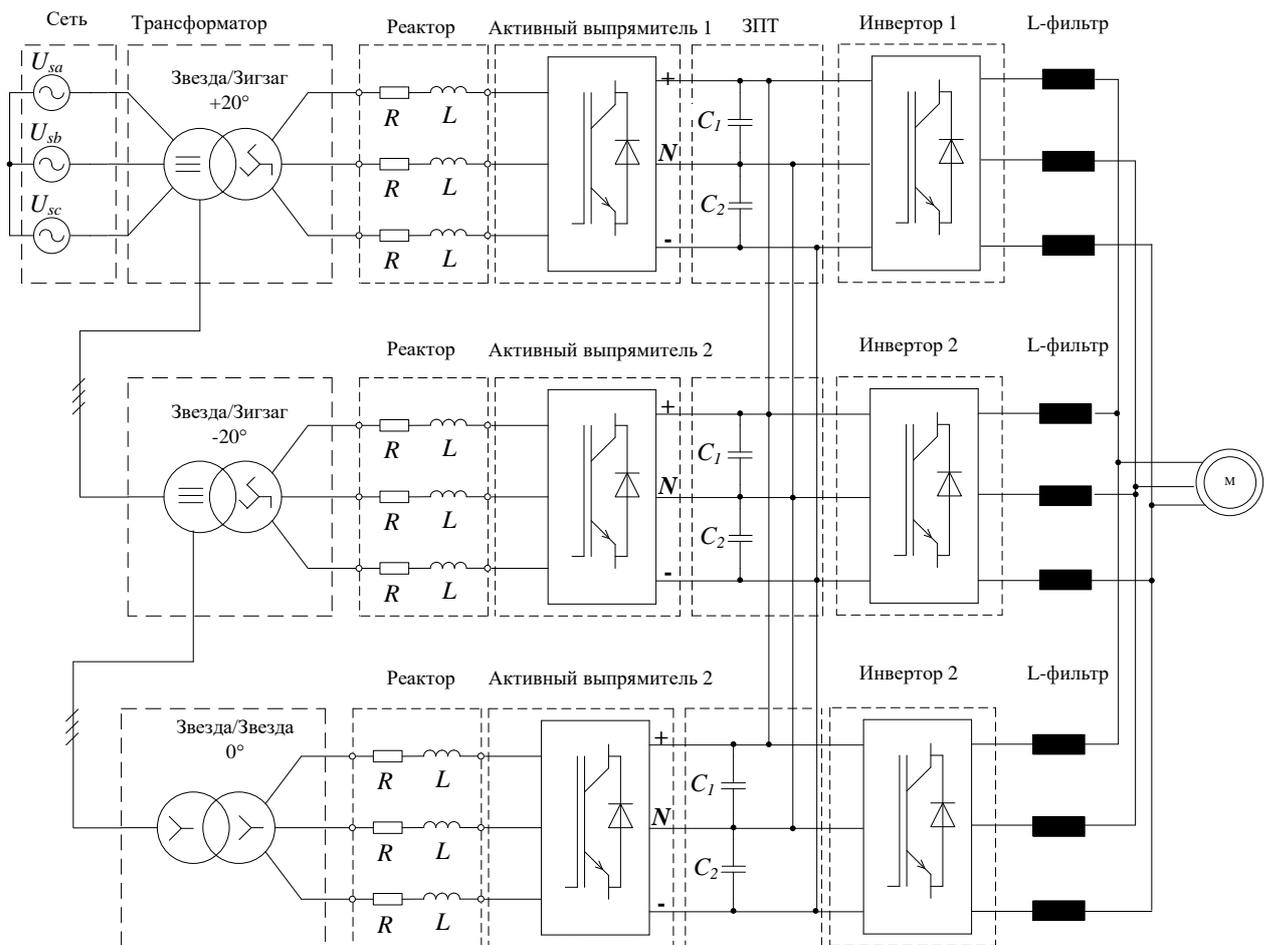


Рисунок 1.6 – 18-ти пульсовая схема соединения ПЧ-АВ

Для этого используются три силовых трансформатора первичные обмотки которых подключены последовательно. Вторичные обмотки двух трансформаторов соединены по схеме зигзаг, для этого вторичные обмотки разделены на секции с соотношением к первичным на 35 и 35% для создания необходимого угла сдвига между первичным и вторичным напряжениями в $\pm 20^\circ$. Вторичная обмотка третьего трансформатора соединена по схеме звезда. Благодаря такому соединению вторичных обмоток достигается угол сдвига между первичным напряжением и вторичными в $0^\circ, \pm 20^\circ$. Восемнадцатипульсная схема имеет более лучшие показатели качества, потребляемого тока чем 6-ти и 12-ти пульсные схемы. Так как при использовании 18-ти пульсной схемы в токе и напряжении, потребляемым ПЧ-АВ, присутствуют гармоники $18n \pm 1$ [17]. Гармонический состав и форма фазного сетевого тока АВ с 18-ти пульсной схемой питания при использовании ШИМ с удалением выделенных гармоник ($n=5, 7, 17, 19, 35$ и 37) приведены на рисунке 1.7 [17].

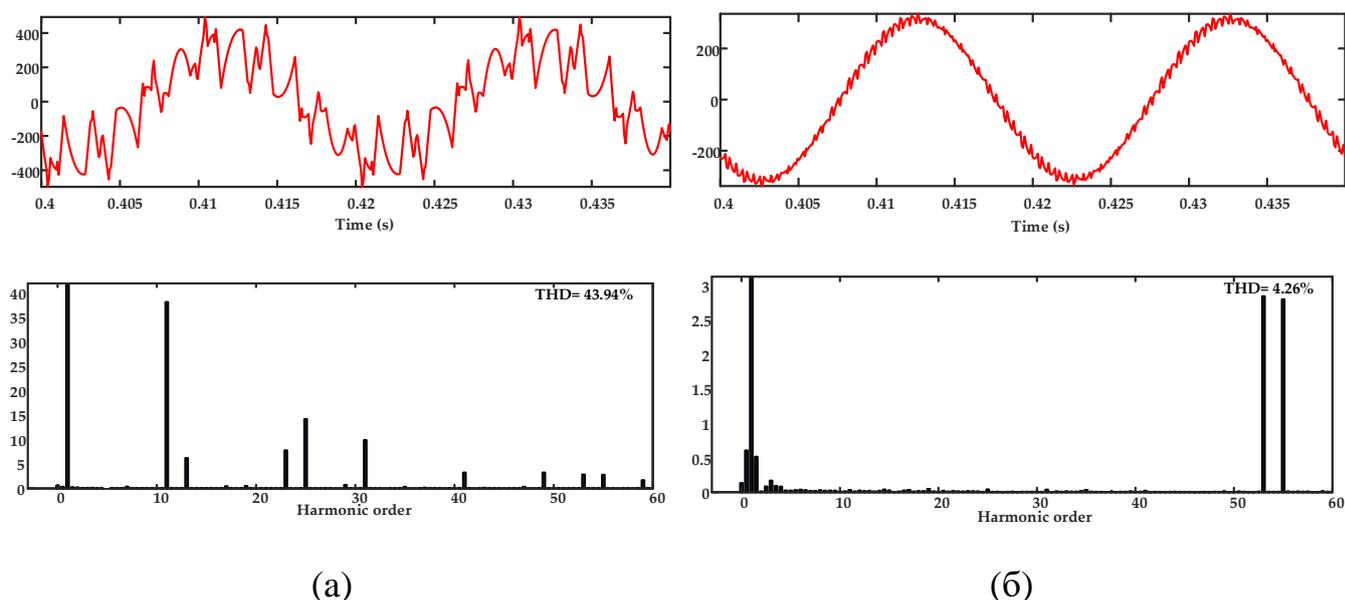


Рисунок 1.7 – Гармонический состав и форма фазного сетевого тока АВ с 18-ти пульсной схемой питания при использовании ШИМ с удалением выделенных гармоник ($n=5, 7, 17, 19, 35$ и 37): (а) сетевой ток отдельного выпрямителя; (б) суммарный сетевой ток

Как было сказано выше, для управления ключами АВ используется ШИМ, в гармоническом составе тока и напряжения присутствуют гармоники высокого порядка, которые усиливают резонансные области частотной характеристики

питающей сети 6-35 кВ, в связи с этим происходит значительное ухудшение напряжения внутриводской сети. По этой причине электроснабжение мощных электроприводов с ПЧ-АВ осуществляется от отдельного силового трансформатора, чтобы избежать взаимодействия высокочастотных гармоник с распределенной емкостью кабельных линий.

1.2. Анализ существующих конфигураций систем внутриводского электроснабжения различных металлургических предприятий

Проведен анализ существующих конфигураций различных типов металлургических заводов. Основное различие крупного металлургического предприятия от мини-завода заключается в том что, как правило, на крупном предприятии имеется множество различных подстанций глубокого ввода, узловых подстанций, в то время как электроснабжение мини-завода представляет собой одну главную понизительную подстанцию, которая питает всю нагрузку металлургического предприятия [15].

Типовая схема электроснабжения крупного металлургического предприятия мини-завода приведена на рисунке 1.8.

На схеме можно выделить две крупные подстанции, запитанные от районных энергосистем, которые в свою очередь запитывают множество небольших подстанций.

Основными потребителями являются листопрокатные цеха (ЛПЦ), в которых осуществляется горячая и холодная прокатка стали; доменные цеха, электросталеплавильные цеха (ЭСЦ), в которых осуществляется плавка лома; коксохимические цеха; сортопрокатные цеха (СПЦ); заводская теплоэлектроцентраль (ТЭЦ) и т.д. Основные электроприемники запитываются с множества небольших подстанций, за счет чего длина кабельных и воздушных трасс не велика, поскольку подстанции находятся рядом с основным потребителем.

На схеме можно выделить главную понизительную подстанцию предприятия ГПП 220/35/10 кВ, от которой получают питание электросталеплавильный комплекс и остальные электроприемники электросталеплавильного и

сортопрокатного цехов, а также других вспомогательных объектов, таких как: участки газоочистки и водоподготовки, скрапное отделение, блок разделения воздуха.

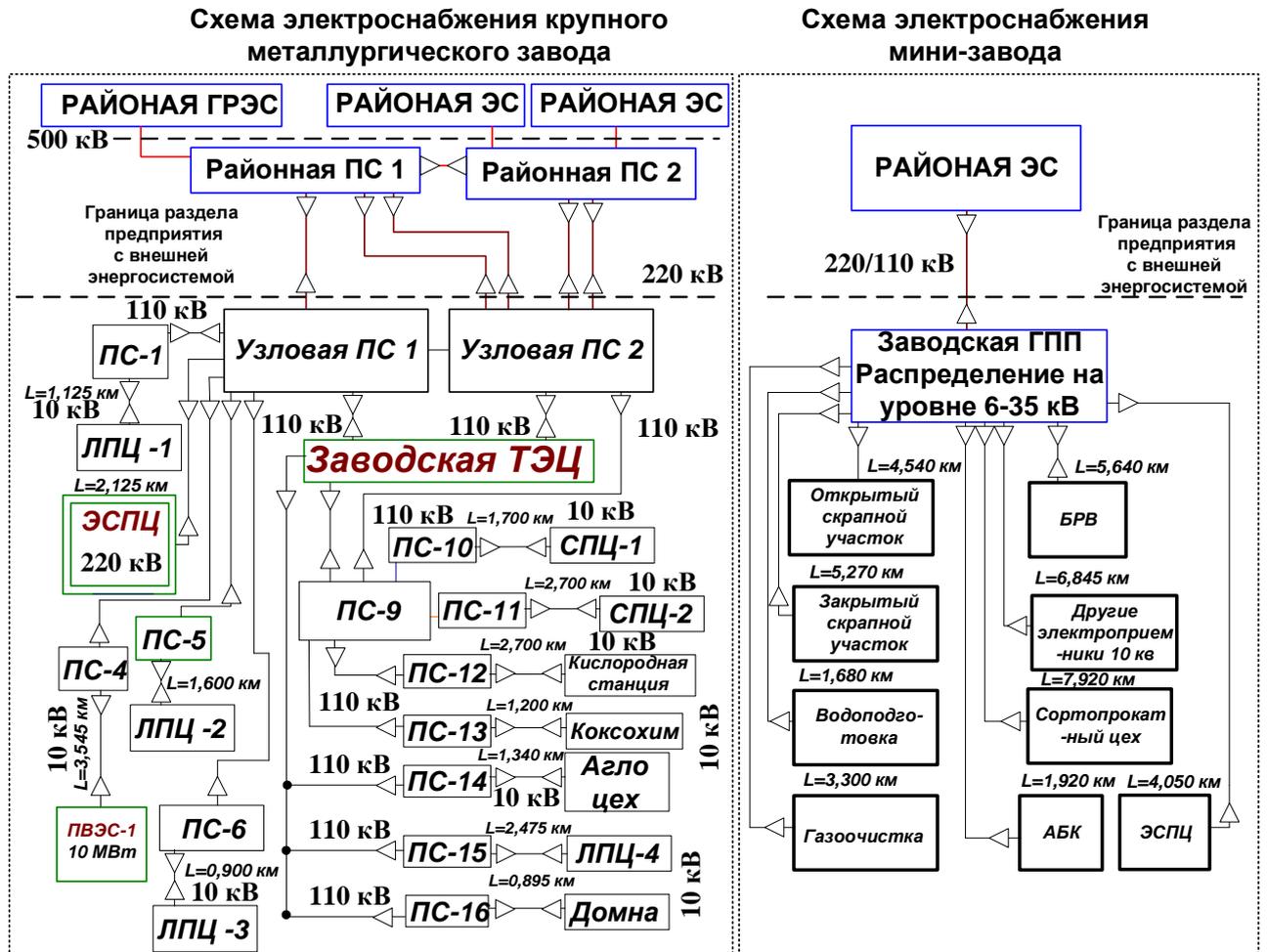


Рисунок 1.8 - Классические блок-схемы СЭС крупного металлургического предприятия и компактного мини-завода

Электрической нагрузкой являются комплектные трансформаторные подстанции и отдельные понизительные трансформаторы 10/0,4 кВ, от которых получают питание различные низковольтные электроприводы кранов, насосов и других многочисленных механизмов электросталеплавильного и сортопрокатного цехов, отделений водоподготовки и газоочистки, скрапного участка и т.д. Также присутствует большое количество высоковольтных сетевых двигателей 10 кВ механизмов дымососов и компрессоров, функционирующих в различных цехах.

Важной особенностью системы внутризаводского электроснабжения электроприемников 10 кВ мини-заводов является большое количество кабельных

линий, подключенных общему ЗРУ-10 кВ. Суммарная длина линий, подключенных к ЗРУ-10 кВ, с учетом КЛ, отходящих от цеховых РУ, превышает 40 км [16].

Сравнительный анализ параметров системы электроснабжения (СЭ) крупного металлургического предприятия и мини завода представлен в таблице 1.1. Из таблицы видно, что насколько сильно отличается совокупная длина кабельных линий распределительных сетей среднего напряжения, подключенных к индивидуальной подстанции. Если для крупного предприятия с полным металлургическим циклом, с совокупной установленной мощностью электроприемников $P_{уст. сумм.} \approx 0,8 - 1,5$ ГВт совокупная длина кабельных линий распределительных сетей среднего напряжения, подключенных к индивидуальной подстанции, не превышает 10 км, то в компактном металлургическом заводе с $P_{уст. сумм.} < 0,5$ ГВт, эта длина превышает 40 км, что безусловно сказывается на суммарной емкости кабельной линии. На крупном металлургическом предприятии эта величина примерно равняется 1,75 мкФ, на мини-заводе 14 мкФ. Таблица 1.1 – Сравнительный анализ параметров СЭ крупного металлургического предприятия и компактного металлургического предприятия

Тип металлургического завода	Особенности системы электроснабжения	Совокупная длина КЛ распределительных сетей среднего напряжения L , км	Суммарная емкость КЛ, $C_{кл.сумм.}$, мкф	Индуктивное сопротивление сетевого трансформатора ПП X_T , Ом	Частота $f_{рез}$, Гц / номер гармоники (n)
Крупное металлургическое предприятие с $P_{уст.сумм.} \approx 0,8 - 1,5$ ГВт.	Наличие индивидуальной подстанции для каждого крупного цеха	< 8	$\approx 2,05$	$\approx 19,9$	11900 (238)
Компактный металлургический завод с $P_{уст.сумм.} < 0,5$ ГВт.	Наличие одной ГПП с ЗРУ 10 (6) кВ. Протяженные КЛЭП и ВЛЭП	> 50	$\approx 18,65$	$\approx 37,51$	3250 (65)

Большая протяженность линий обуславливает наличие значительной распределенной емкости, которая вместе с индуктивностью сетевого трансформатора 220/10 кВ может создать неблагоприятный резонанс токов, частота которого может совпасть с частотной областью генерирования гармоник

различными силовыми преобразователями. Данная особенность характерна для систем внутриводского электроснабжения небольших металлургических заводов, где имеет место одна ГПП с ЗРУ-10 кВ, от которой получает питание по кабельным линиям основная часть электроприемников цехов. В этом случае вся емкость разветвленной сети 10 кВ сосредоточена на секциях одной ЗРУ-10 кВ. Система электроснабжения крупных предприятий отличается от системы небольших заводов. Использование нескольких ГПП для отдельных цехов исключает резонансные токи в частотных характеристиках сети среднего напряжения, расположенных в области частот > 10 кГц, на которых отсутствуют значения гармоник современных ПЧ-АВ [1, 15]. Сравнительный анализ частотных характеристик сети 10 кВ внутриводского электроснабжения крупного и компактного металлургических предприятий приведен на рисунке 1.9.

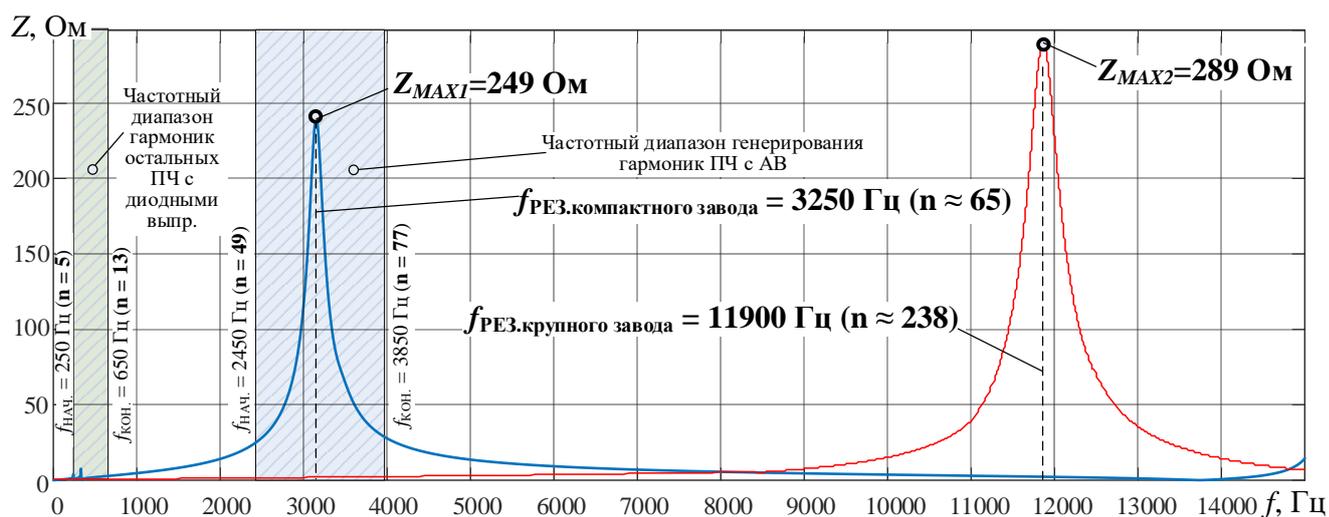


Рисунок 1.9 - Анализ частотных характеристик сети 10 кВ внутриводского электроснабжения крупного и компактного металлургических предприятий

1.3. Анализ существующих способов улучшения качества напряжения внутриводских распределительных сетей 6-35 кВ с мощными электроприводами на базе ПЧ-АВ

Существуют различные способы борьбы с резонансными явлениями в электрических сетях среднего напряжения, в которых присутствуют мощные электроприводы прокатных станков с ПЧ-АВ.

На основе литературного обзора произведен анализ существующих способов борьбы с резонансными явлениями в электрических сетях среднего напряжения, в которых присутствуют нелинейные потребители, такие как мощные приводы прокатных станов с ПЧ-АВ, применяемых в системах электроснабжения металлургических предприятий [1, 15, 17-25].

В настоящее время проблема электромагнитной совместимости мощных электроприводов на базе ПЧ-АВ с внутриводскими сетями 6-35 кВ до конца не решена. Основные производители силовой преобразовательной техники для улучшения качества напряжения в системах внутриводского электроснабжения с мощными ПЧ-АВ применяют следующие технические решения: 1) использование модифицированных алгоритмов ШИМ для активных выпрямителей с удалением или ослаблением выделенных гармоник (алгоритмы Selective Harmonic Elimination PWM и Selective Harmonic Mitigation PWM); 2) использование встроенных в ПЧ-АВ L-C-L фильтров, устанавливаемых на входе активного выпрямителя; 3) использование классических узкополосных и широкополосных фильтров высших гармоник, настроенных на удаление гармоник определенного ряда; 4) использование специальных схем электроснабжения, предусматривающих выделение «грязной» секции в РУ-6-35 кВ ГПП предприятия для индивидуального питания электроприводов на базе ПЧ-АВ.

1.3.1. Применение адаптивных алгоритмов ШИМ для улучшения ЭМС ПЧ-АВ с внутриводской распределительной сетью

Альтернативным способом снижения негативного влияния резонансных явлений на сеть могут стать адаптивные усовершенствованные алгоритмы ШИМ, исключаящие из кривой тока, потребляемого активными выпрямителями, гармоники, совпадающие с областью резонанса в частотной характеристике. Данный способ подробно описан в диссертационной работе Буланова [26, 27].

Суть адаптивных алгоритмов ШИМ заключается в пересмотре подхода к определению углов переключения силовых модулей АВ. Производителями преобразовательной техники главным критерием в определении углов

переключения выбрана минимизация или исключение определённых гармоник, регламентируемых основными мировыми стандартами качества электроэнергии. Этим достигается минимизация K_U на входе АВ. При этом форма частотной характеристики питающей сети 6-35 кВ не учитывается. В адаптивных алгоритмах ШИМ АВ напротив, главным критерием является минимизация K_U в сети 6-35 кВ, исходя из чего определяются углы переключения АВ [26, 27].

На практике эффективность данного способа удалось проверить на действующем оборудовании четырёхклетьевого стана на Череповецком металлургическом комбинате, Россия. Главные электроприводы данного стана (рисунок 1.10) выполнены на основе ПЧ-АВ по 6-пульсной и 12-пульсной топологии.

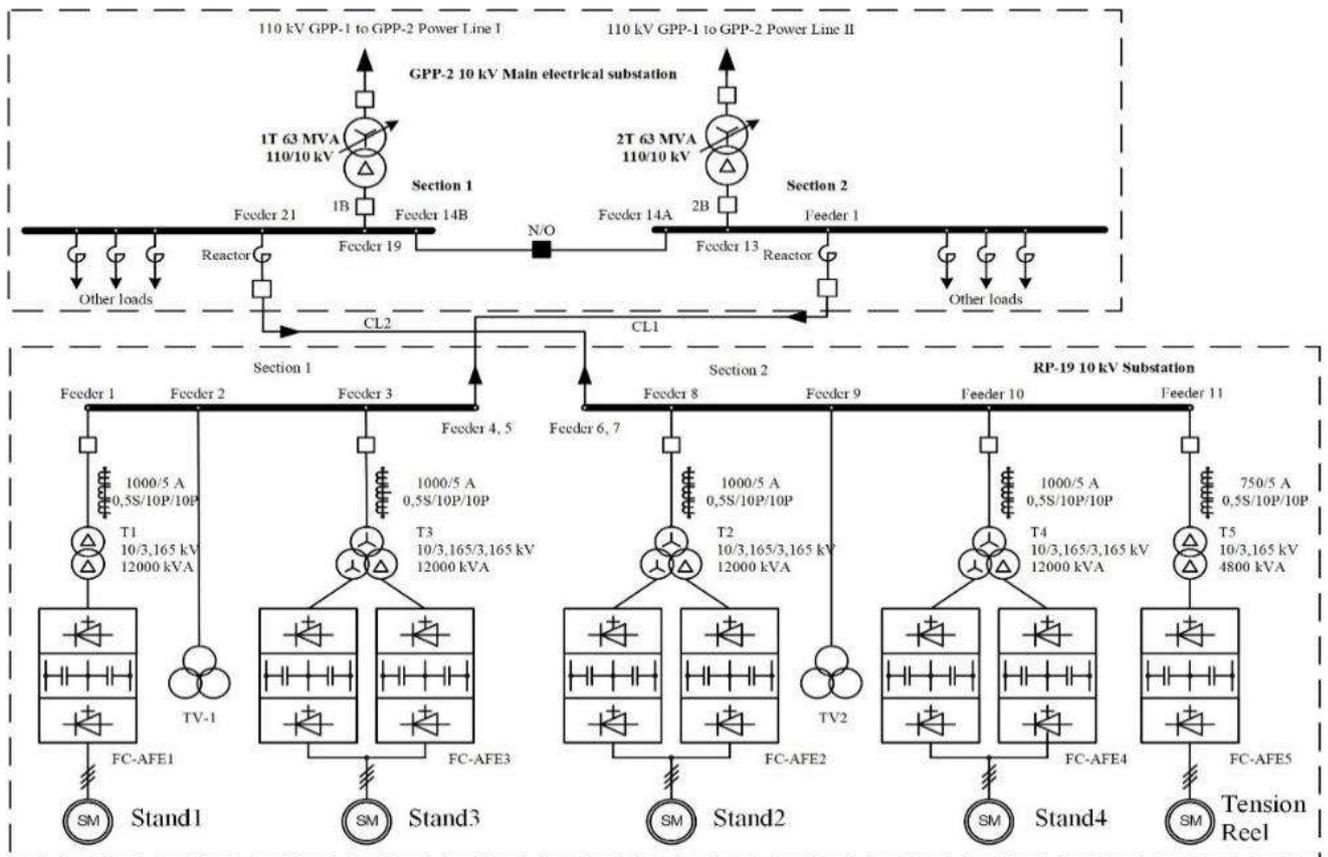


Рисунок 1.10 - Схема электроснабжения главных электроприводов стана холодной прокатки.

Главные электроприводы запитаны от внутривозвской распределительной сети 10 кВ ГПП-2 через согласующие трансформаторы 10/3,15 кВ. Особенности распределительной сети 10 кВ являются наличие во всех ячейках

ГПП-2 токоограничивающих реакторов и значительная суммарная длина отходящих кабельных линий, превышающая 97 км. Суммарная ёмкость кабельных линий при этом достигает: относительно первой секции 11,63 мкФ; относительно второй секции 10,08 мкФ.

После изменения настроек ШИМ АВ в соответствии с предложенными рекомендациями во внутривародской распределительной сети района ГПП-2 был получен технический эффект в виде улучшения формы кривой напряжения 10 кВ и снижения K_U на 47,4-82,3 %, в зависимости от режима электроснабжения и режима работы стана (рисунок 1.11). Также значительно улучшилась форма напряжения в РП-19, K_U снизился на 23,9-51,4% [26, 27].

В Диссертационной работе Гилемова [28, 29] был рассмотрен иной подход к модифицированию алгоритмов ШИМ для улучшения ЭМС мощных ПЧ-АВ с питающей распределительной сетью.

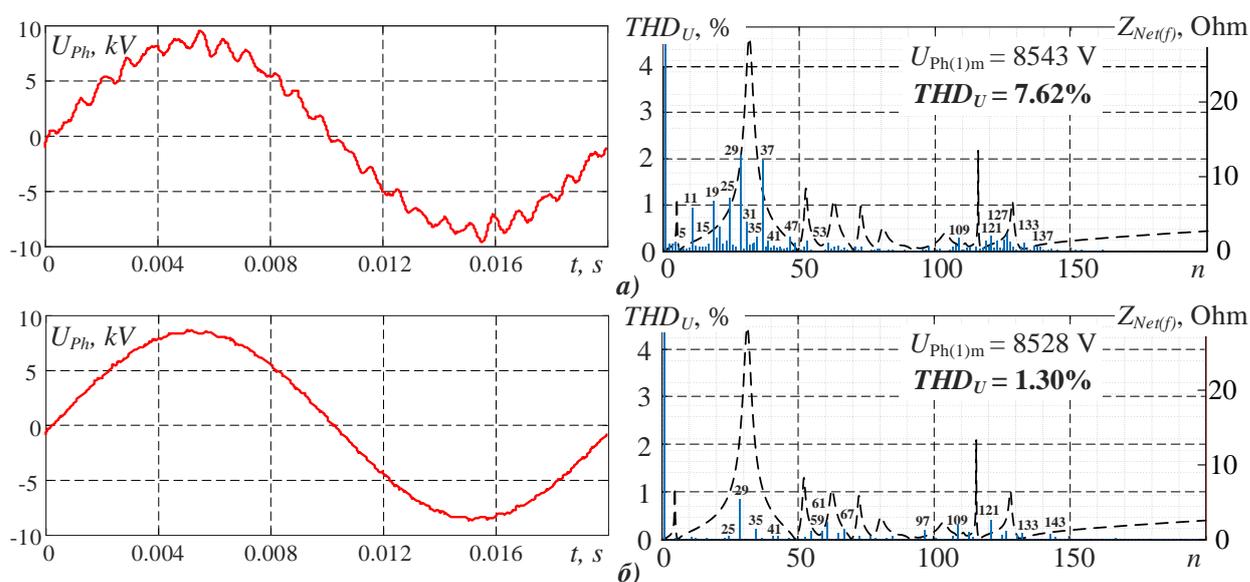


Рисунок 1.11 - Сравнение осциллограмм фазного напряжения сети 10 кВ ГПП-2 и их спектральный анализ а) до применения адаптивных ШИМ АВ; б) после применения адаптивных ШИМ АВ.

Способом обеспечения ЭМС ПЧ-АВ с питающей сетью во всех режимах работы электропривода может стать усовершенствованная система управления АВ с динамическим выбором таблицы углов переключения силовых ключей на основе алгоритмов SHE/SHMPWM.

номинальному. В связи с этим, было предложено использовать три таблицы углов переключения силовых ключей для усовершенствованной системы управления AFE: 1) для режима работы с нагрузкой, близкой к номинальной, с исходной частотой коммутации силовых ключей; 2) таблица с несколько увеличенной частотой коммутации по сравнению с первой для режима работы со сниженной нагрузкой при разгоне электроприводов стана холодной прокатки; 3) для режима холостого хода электропривода с максимальной частотой коммутации силовых ключей [28, 29].

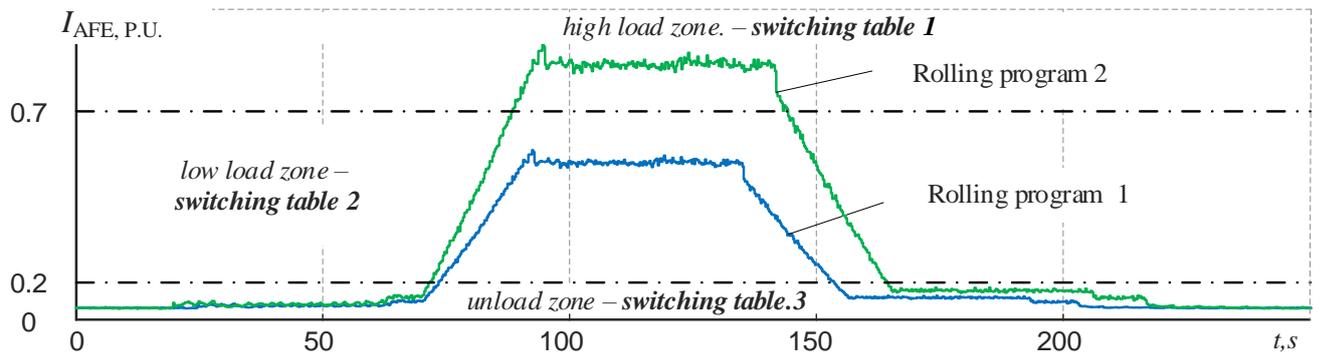


Рисунок 1.13- Применение таблиц с различной частотой коммутации в зависимости от режима работы электропривода стана

На рисунке 1.14 приведены графики изменения коэффициента K_U за цикл работы стана холодной прокатки для секций 1 и 2 ГПП, являющейся точкой общего подключения цеховых электроприемников.

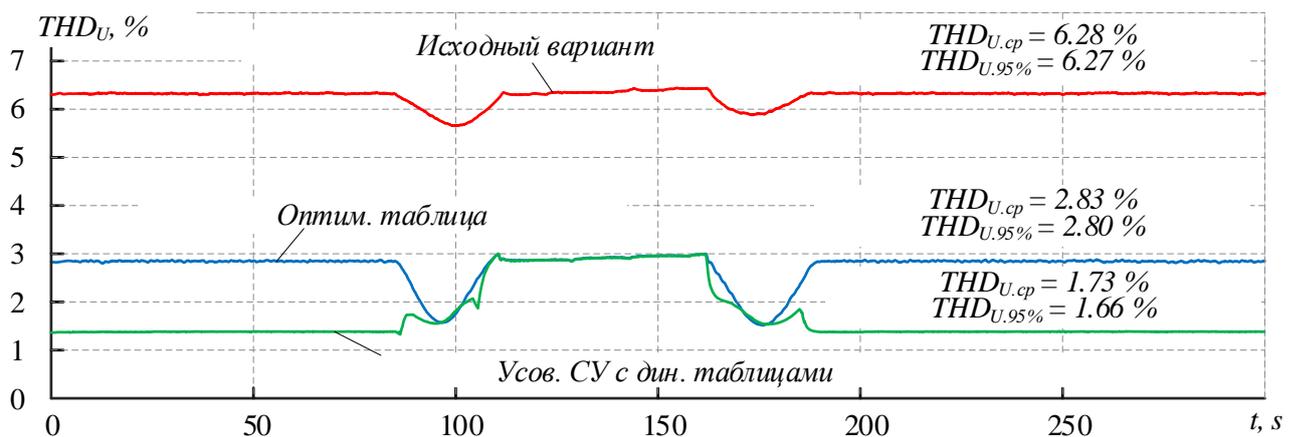


Рисунок 1.14- Графики изменения коэффициента K_U за цикл работы прокатного стана для секций 1 и 2 ГПП при их совместной работе от одного сетевого трансформатора.

В данном случае была применена усовершенствованная система управления с SHEPWM с тремя таблицами углов переключения с различной частотой коммутации и удалением гармоник в зоне резонанса. Красная линия соответствует K_U при исходных углах переключения АВ; синяя линия соответствует K_U при работе с адаптивными таблицами углов переключения АВ, внедрённых в ходе предыдущих исследований; зелёная линия соответствует K_U при усовершенствованной системе управления с динамическим выбором таблиц углов переключения.

Необходимо отметить большую эффективность предложенной системы управления с динамическим выбором числа переключений АВ в сравнении с системой управления с одной оптимальной таблицей [28, 29].

Адаптивные алгоритмы ШИМ были внедрены на ряде предприятий с действующими электроприводами с ПЧ-АВ среднего напряжения коллективом Николаева, Буланова, Гилемова [1, 15, 26-30]. Данные алгоритмы позволили значительно улучшить ЭМС ПЧ-АВ с питающей сетью и устранить ранее возникавшие аварийные ситуации. Однако следует отметить, что реализация данных алгоритмов связана с некоторыми трудностями, которые ограничивают повсеместное применение адаптивных ШИМ.

Для реализации нового алгоритма ШИМ необходимо содействие специалистов фирмы производителя ПЧ-АВ, поскольку доступ к контроллерам ШИМ в большинстве случаев является закрытым для всех, кроме сервисных сотрудников. В работах Буланова, Гилемова [26-29] отмечается, что именно представителями фирм производителей ПЧ-АВ производилась перенастройка контроллера ШИМ, в соответствии с выданными рекомендациями. Реализация же системы управления с динамическим выбором таблиц переключений АВ связана со значительным изменением программного обеспечения ПЧ-АВ, что также может быть затруднительно. Также, в связи с санкциями, работа иностранных специалистов по настройке оборудования от профильных организаций, таких как Siemens, ABB, Danieli, Convertteam, Toshiba-Mitsubishi и т.д., в данный момент времени довольно тяжело реализуема. Перечисленные факторы затрудняют

широкомасштабное внедрение рассмотренных в диссертации способов улучшения ЭМС ПЧ-АВ с питающей сетью среднего напряжения.

1.3.2. Использование специальных схем электроснабжения с использованием «грязной» секции для независимого питания силовых преобразователей и применение L-C-L фильтров на входе ПЧ-АВ

В качестве примера рассмотрим конфигурацию системы электроснабжения прокатного цеха на одном из металлургических предприятий, где также проводились измерения показателей качества электрической энергии. На главной понизительной подстанции 110/10 кВ установлено два трансформатора Т1 и Т2 с расщепленными вторичными обмотками (рисунок 1.15).

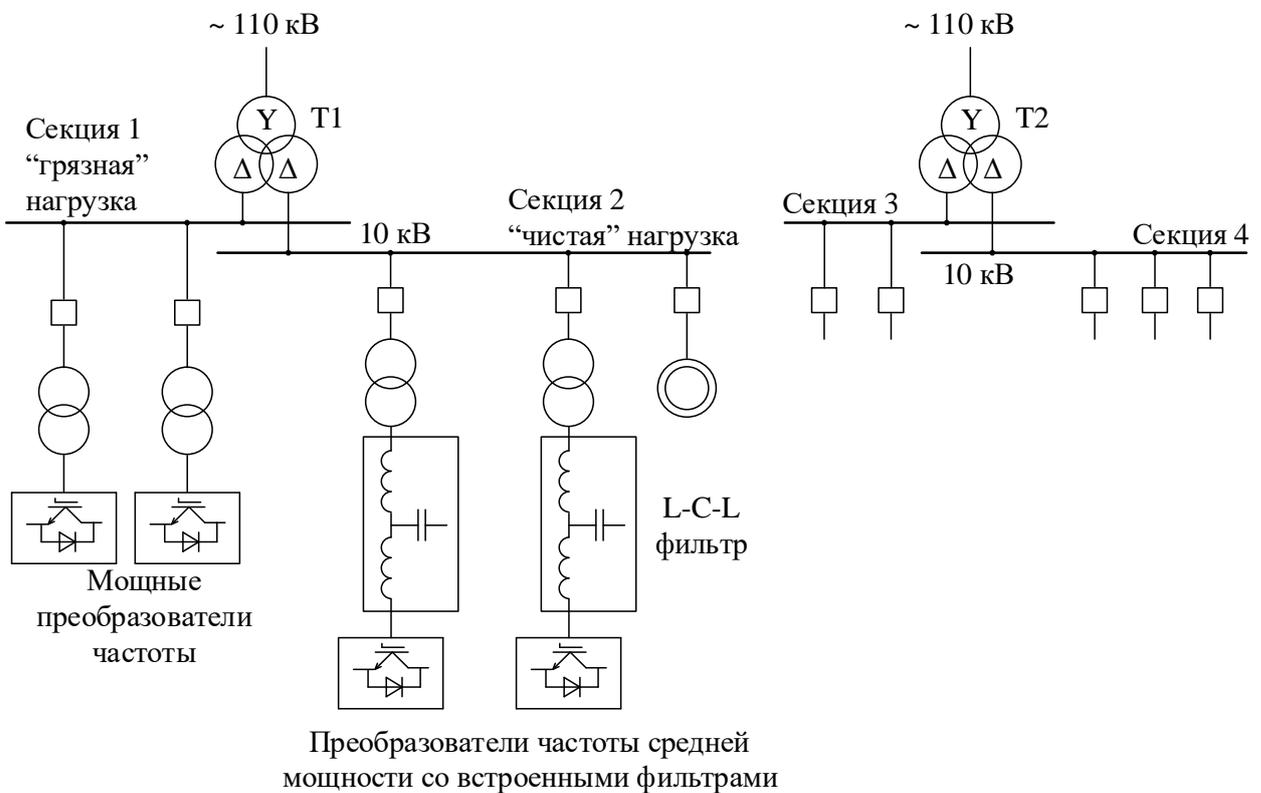
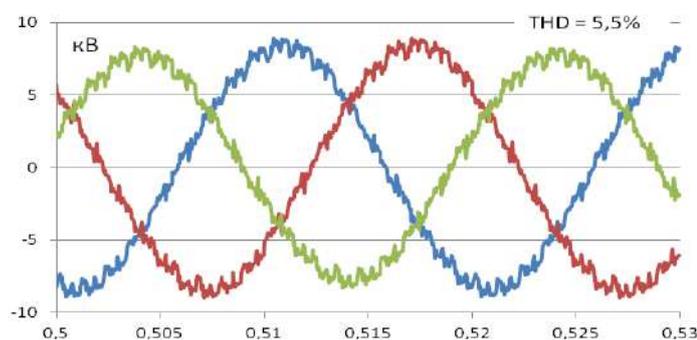


Рисунок 1.15 - Упрощенная схема системы электроснабжения прокатного цеха металлургического завода, трансформаторы ГПП выполнены с расщепленными вторичными обмотками

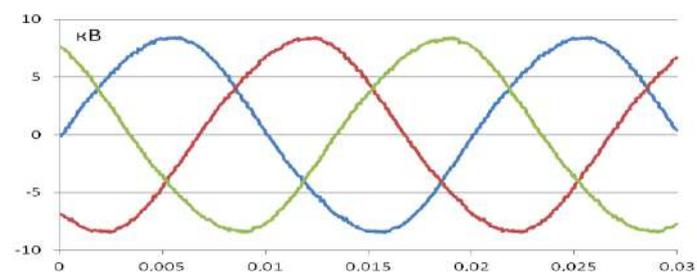
Установка таких трансформаторов позволяет: во-первых, увеличить число секций ГПП с двух до четырех, во-вторых, улучшить гармонический состав напряжения на одной из смежных секций. Если на одну секцию (секция 1) подключена мощная нелинейная нагрузка, например, преобразователи частоты

главных приводов прокатного стана, то в отсутствие фильтров высших гармоник на секции 1 гармоники тока, генерируемые этой нагрузкой, протекают через трансформатор и замыкаются через питающую сеть 110 кВ.

При этом за счет падения на внутреннем сопротивлении вторичной обмотки они создают искажения кривой напряжения на этой секции. Проникновению гармоник тока на смежную секцию 2 препятствует сумма сопротивлений двух вторичных обмоток, поэтому искажения кривой напряжения на секции 2 в основном обусловлены собственной нелинейной нагрузкой [12]. В подтверждение сказанного на рисунке 1.16 представлены осциллограммы фазных напряжений на двух смежных секциях, получающих питание от расщепленных вторичных обмоток трансформатора ГПП 110/10 кВ. Как следует из осциллограмм, кривая напряжения на одной секции (рисунок 1.16, а) сильно искажена под действием нелинейной нагрузки, которая получает питание от нее. Тем не менее, кривая напряжения на смежной секции практически синусоидальна [31].



а



б

Рисунок 1.16 - Осциллограммы фазных напряжений на двух смежных секциях (а – 1 секция, б - 2 секция), получающих питание от расщепленных вторичных обмоток трансформатора ГПП 110/10 кВ

Зачастую проблемы ЭМС мощных ЭП на базе ПЧ-АВ с питающей электрической сетью на этапе проектирования систем электроснабжения промышленных предприятий не прогнозируются. О них становится известно после монтажа электрооборудования и запуске технологического процесса.

В этом случае перечень традиционных способов обеспечения ЭМС ПЧ-АВ с питающей сетью, в которой не применяются дополнительные фильтры высших гармоник и альтернативные алгоритмы ШИМ АВ, ограничивается следующими мероприятиями:

- выделением одной секции на цеховой ГПП (грязной секции), от которой будут получать питание преобразователи частоты большой мощности (по такому же принципу как на рисунке 1.15). Данный способ имеет высокую эффективность, поскольку изолирует источник помех от чувствительного оборудования;

- исключением питания ненагруженных кабельных линий 10 кВ (имеет ограниченный эффект в виде смещения экстремума резонанса) [1, 15].

Стоит отметить, что данные способы на действующем производстве будут сопряжены со значительными затратами времени и ресурсов на переключения кабельных линий и изменения компоновки распределительных устройств ГПП. Либо при ограниченной мощности трансформаторов на ГПП могут оказаться вообще не реализуемыми [32-34].

Обеспечение электромагнитной совместимости регулируемых электроприводов средней мощности может достигаться за счет применения преобразователей частоты, на входе которых установлены L-C-L фильтры (рисунок 1.17). Остановимся на этом вопросе подробнее, но первоначально осветим решение этого вопроса на этапе проектирования применительно к электроприводам сортового цеха АО «Металлургический завод Балаково».

Регулируемые электроприводы сортового цеха фирмы Siemens выполнены по технологии Smart. Входной выпрямитель в составе преобразователя частоты выполнен по трехфазной мостовой схеме, однако в качестве ключей применены не просто диоды, а параллельное соединение диодов и IGBT транзисторов. В двигательном режиме работы электропривода ток протекает только по диодам,

транзисторы закрыты, поскольку напряжение в звене постоянного тока меньше мгновенных значений напряжения в сети. В тормозных режимах напряжение звена постоянного тока вырастает и оказывается больше напряжения сети, как следствие, диоды мостовой схемы закрываются, а ток протекает через транзисторы. На холостом ходу ток протекает попеременно – часть периода времени через диоды, часть – через транзисторы, в зависимости от соотношения двух указанных напряжений.

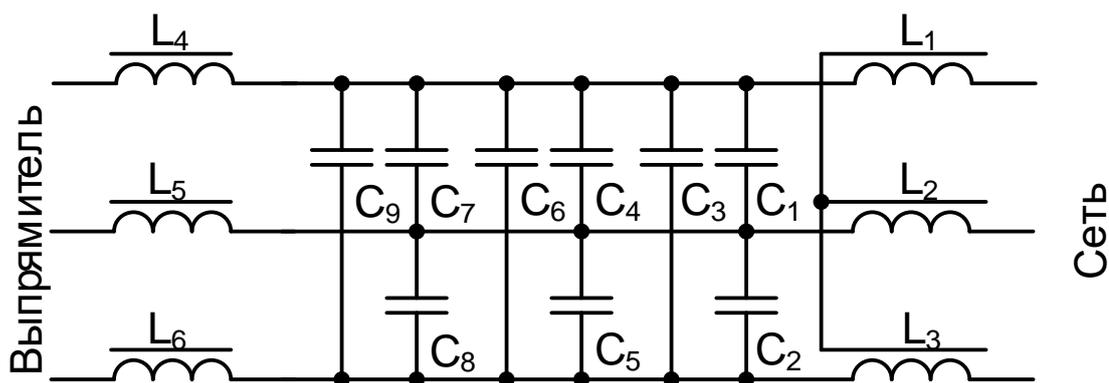


Рисунок 1.17 - Принципиальная схема L-C-L фильтра высших гармоник, применяемого в преобразователях типа AFE

Специальная схема в системе управления преобразователем формирует управляющие сигналы для транзисторов. Указанные сигналы имеют форму широких импульсов, длительностью чуть меньше 120 электрических градусов. Фаза этих импульсов синхронизируется с вектором напряжения сети, это производится специальным модулем – цифровым датчиком напряжения VSM-10 (Voltage Sensor Module). В составе модуля на программном уровне предусмотрена цифровая фильтрация мгновенных значений напряжения сети, что при правильной настройке фильтра позволяет повысить помехоустойчивость преобразователя к высшим гармоникам питающего напряжения [35-37].

Если допустить, что на ГПП АО «Металлургический завод Балаково» установлены трансформаторы 220/10 кВ с расщепленными вторичными обмотками, и предусмотреть питание приводов фирмы Siemens от одной секции («чистой»), а питание приводов скоростных блоков №1, 2, 3 с преобразователями фирмы TMEIC от другой секции («грязной»), то даже при появлении резонансных

явлений на шинах 10 кВ, они не оказывали бы влияния на преобразователи Siemens.

Вернемся к вопросу обеспечения электромагнитной совместимости регулируемых электроприводов средней мощности с помощью преобразователей частоты, на входе которых установлены L-C-L фильтры (рисунок 1.17).

Альтернативой по отношению к технологии Smart (от фирмы Siemens) является технология active front-end (AFE), которую используют в преобразователях как фирма Siemens, так и другие производители, например, Vacon). Обязательным условием применения технологии AFE является установка L-C-L фильтра на входе преобразователя частоты. Указанный фильтр является неотъемлемой частью преобразователя. Силовая схема преобразователя частоты AFE выполнена симметричной, т.е. в активном выпрямителе используется точно такая же мостовая схема как в инвертере. Причем, если в преобразователях Smart транзисторы выпрямителя вступают в работу только в тормозных режимах и на холостом ходу, то в преобразователях AFE – они работают непрерывно в режиме широтно-импульсной модуляции [38, 39].

Использование ШИМ позволяет стабилизировать напряжение в звене постоянного тока на заданном уровне и значительно повысить уровень гармонической совместимости преобразователя с питающей сетью [1, 15]. Действительно, частота модуляции в активном выпрямителе AFE составляет 1,5 – 3,6 кГц, на этих частотах индуктивное сопротивление сети в точке подключения преобразователя оказывается значительным, поэтому высшие гармоники тока замыкаются через конденсаторы L-C-L фильтра (рисунок 1.17) и практически не проникают в сеть. Таким образом, преобразователи частоты с технологией AFE, в отличие от преобразователей Smart, имеют индивидуальную фильтрацию высших гармоник тока [30, 32].

Изучение имеющейся документации по преобразователям фирмы TMEIC, позволяет утверждать следующее: фирмой производителем не предусматриваются какие-либо фильтрующие цепи на входе активных выпрямителей. Причем это касается не только преобразователей серии TMdrive-

70, которые установлены в рассматриваемом сортовом цехе АО «Металлургический завод Балаково», но и преобразователей других серий, например, TMdrive-80.

Также следует отметить, что применение специальных фильтрующих цепей, например, L-C-L фильтров, как правило, рекомендуется для преобразователей средней мощности (до 1,5 МВА) и напряжением до 1000 В [40].

1.3.3. Применение традиционных фильтрокомпенсирующих устройств для улучшения ЭМС ПЧ-АВ с внутривозвратной распределительной сетью

Одним из вариантов решения проблемы ЭМС мощных ПЧ-АВ с внутривозвратной сетью 6-35 кВ является применение классических фильтров (рисунок 1.18 а, б, в, г, д, е) [41-59]. Фильтры подключаются параллельно нагрузке группами и настраиваются обычно на фиксированные частоты наиболее значительных гармоник тока, как в нелинейной нагрузке, так и в регулируемых устройствах статической компенсации. Данные фильтры гармоник являются емкостными на своей основной частоте и используются для получения дополнительной реактивной мощности, которая необходима преобразователям частоты. Они также позволяют корректировать коэффициент мощности. Традиционные фильтры настраиваются на фильтрацию определенных гармоник. Как правило, это гармоники тока $n = 5, 7, 11, 13...$ или иные, необходимые для работы преобразователю частоты с выпрямителем, которые он потребляет. Уменьшение искажения происходит за счет отвода гармонических токов в область с низким импедансом [60-65].

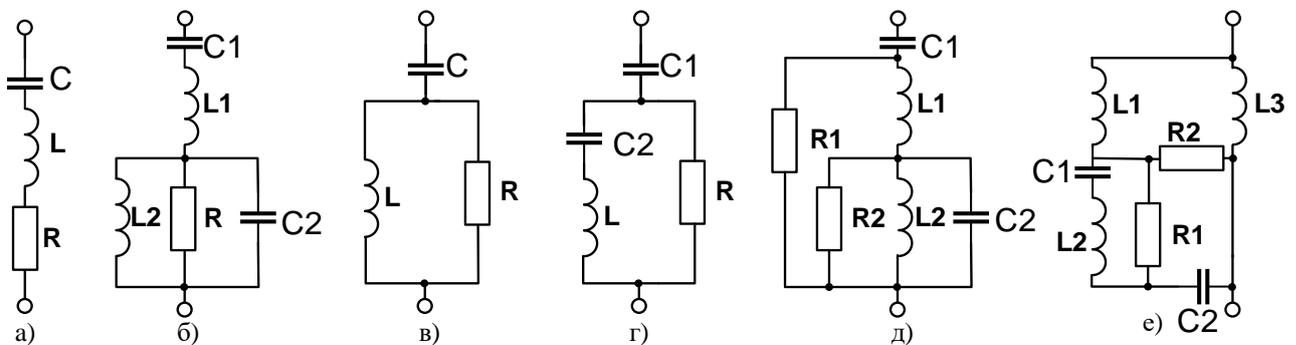


Рисунок 1.18 - Основные типы фильтров гармоник: (а) одночастотный узкополосный фильтр; (б) двухчастотный фильтр; (в) широкополосный фильтр

высших гармоник; (г) широкополосный фильтр высших гармоник С-типа; (д) конвейерный фильтр; (е) многочастотный фильтр

Для достижения приемлемого качества гармонического состава питающей сети и улучшения ЭМС могут использоваться несколько параллельно подключенных типов классических фильтров гармоник. Полосовые фильтры используются для фильтрации гармоник низкого порядка $n = 3, 5, 7$ и 11 [66-68].

Настройка данных фильтров на определенную частоту или диапазон частот зависит от заданных значений сопротивления R , индуктивности L , емкости C и строения схемы. Также, зная данные значения фильтра, определяются основные параметры ФКУ, такие как:

1. Реактивная мощность при номинальном напряжении.
2. Частота настройки.
3. Добротность – это параметр эффективности фильтрации выбранной гармоники. Добротность определяется значением сопротивления R .

Самый простой – одночастотный узкополосный настраивается на одну частоту (рисунок 1.18 а) Данный фильтр состоит из конденсаторной батареи C и реактора L и является узкополосным вследствие малых активных потерь в образующих его элементах. Эквивалентное сопротивление R показано на рисунке 1.18 а. На рисунке 1.19 показано определение добротности Q и формулы для расчета реактивной мощности Q_C и потерь активной мощности P . Добротность фильтра Q представляет собой добротность реактивного сопротивления на частоте настройке.

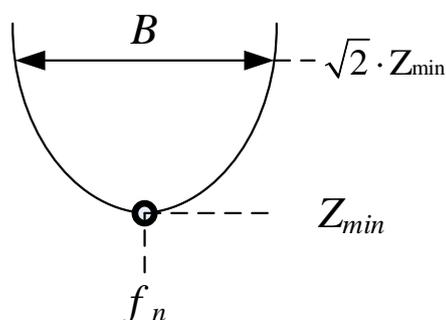


Рисунок 1.19 – Определение добротности Q для одночастотного фильтра

Добротность определяет ширину полосы пропускания B , которая является мерой четкости частоты настройки. Настройка фильтра на определенную гармонику выполняется по формуле (1.1).

$$n = \frac{f_n}{f_1} = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}}, \quad (1.1)$$

где f_1 – основная частота, Гц;

f_n – частота настройки, Гц;

$X_L = \omega \cdot L$ - реактивное сопротивление катушки индуктивности на основной частоте, Ом;

$X_C = 1/(\omega \cdot C)$ - реактивное сопротивление конденсатора на основной частоте, Ом;

$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f_1$ – угловая частота, рад/с.

Добротность фильтра определяется по формуле (1.2)

$$Q = n \cdot \frac{X_L}{R} = \frac{X_C}{n \cdot R}, \quad (1.2)$$

где R – Активное сопротивление, Ом.

Пропускная способность фильтра определяется по формуле (1.3)

$$B = \frac{f_n}{Q}. \quad (1.3)$$

Реактивная мощность фильтра при основной частоте f_1 определяется по формуле (1.4).

$$Q_C = \frac{\left(\frac{U^2}{X_C}\right) \cdot n^2}{(n^2 - 1)}, \quad (1.4)$$

где U – номинальное линейное напряжение, В.

Потери активной мощности при основной частоте f_1 определяется по формуле (1.5).

$$P \approx \frac{\left(\frac{Q_C}{Q}\right) \cdot n}{(n^2 - 1)}, \quad (1.5)$$

График зависимости импеданса от частоты для одночастотного узкополосного фильтра представлен на рисунке 1.20. Частота настройки фильтра соответствует 7 гармонике.

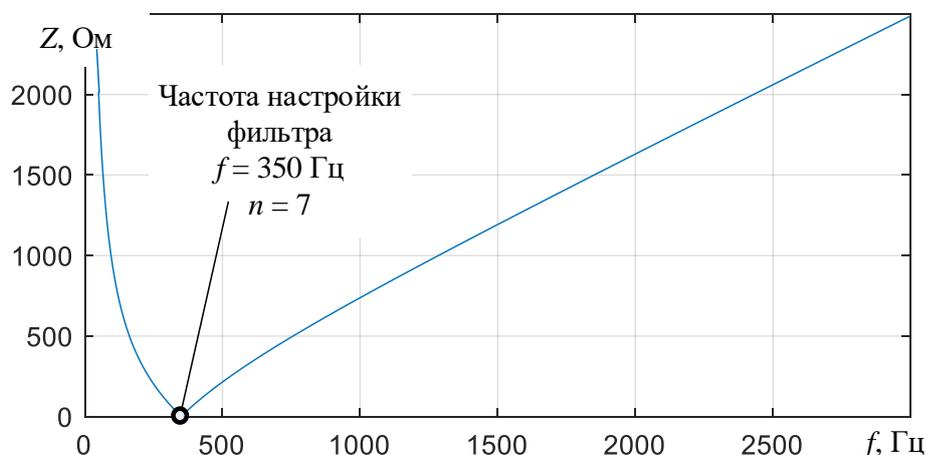


Рисунок 1.20 – График зависимости импеданса от частоты, полученный для одночастотного узкополосного фильтра

Двухчастотный фильтр настраивается на две частоты (рисунок 1.18 б). Он выполняет те же функции, что и два одночастотных узкополосных фильтра, однако у него есть преимущества по сравнению с одночастотным фильтром. Потери ниже, величина импеданса на частоте параллельного резонанса между двумя частотами настройки тоже ниже. Данный фильтр состоит из LC -схемы и параллельной RLC -схемы [69-74]. Если f_1 и f_2 — две частоты настройки, то как последовательная, так и параллельная схема настраиваются примерно на среднюю геометрическую частоту, определяемую по формуле (1.6):

$$f_m = \sqrt{f_1 \cdot f_2} . \quad (1.6)$$

Добротность Q двухчастотного фильтра определяется как добротность параллельных элементов L и R на средней частоте f_m и определяется по формуле (1.7):

$$Q = \frac{R}{(L \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_m)} . \quad (1.7)$$

График зависимости импеданса от частоты для двухчастотного фильтра представлен на рисунке 1.21. Частота настройки фильтра соответствует 11 и 13 гармонике.

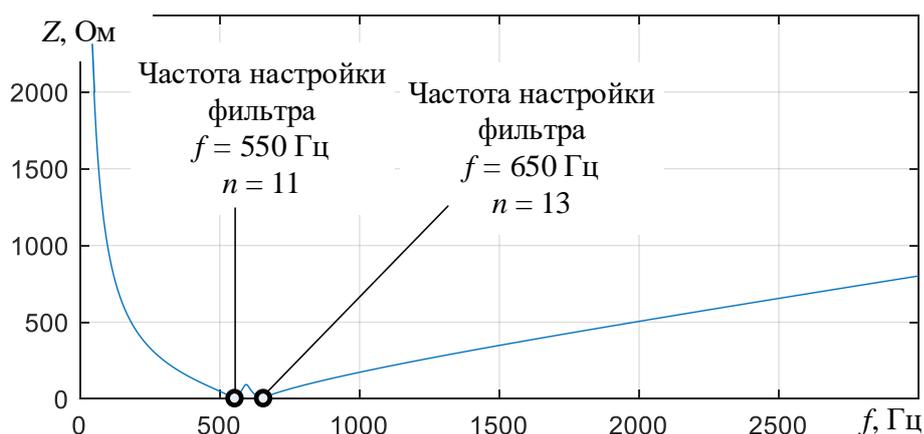


Рисунок 1.21 – График зависимости импеданса от частоты, полученный для двухчастотного фильтра

Широкополосный фильтр высших гармоник (рисунок 1.18 в) используются для фильтрации гармоник высокого порядка, охватывая широкий диапазон частот [75-79]. Он является однонастраиваемым, элементы L и R соединяются параллельно, а не последовательно. За счет такого подключения получают фильтрацию в широком диапазоне. Импеданс на высоких частотах ограничивается сопротивлением R . Такой широкополосный фильтр обычно настраивается на верхнюю частоту ряда фильтруемых в группе частот. При этом зона фильтрации охватывает весь высокочастотный диапазон.

Добротностью Q широкополосного фильтра высших гармоник – это добротность параллельного RL -контура на частоте настройки f_n и определяется по формуле (1.8):

$$Q = \frac{R}{(L \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_n)}. \quad (1.8)$$

График зависимости импеданса от частоты для широкополосного фильтра представлен на рисунке 1.22. Частота настройки фильтра соответствует 23 гармонике.

Широкополосный фильтр высших гармоник С-типа (рисунок 1.18 г) фильтрует высокочастотные гармоники, предотвращает параллельные резонансы и используется для обеспечения реактивной мощности. Он также может фильтровать гармоники в низкочастотной области $n=3, 5$. Данный фильтр

представляет собой фильтр высших гармонических частот. В нем индуктивность L заменяется последовательной LC -схемой, отстроенной на основную частоту.

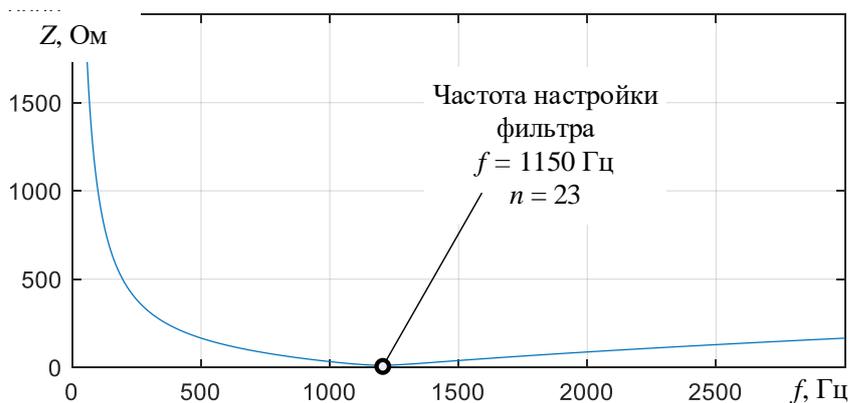


Рисунок 1.22 – График зависимости импеданса от частоты, полученный для широкополосного фильтра высших гармоник

На этой основной частоте сопротивление шунтируется резонансным LC -контуром, за счет чего потери равны нулю [80-86]. График зависимости импеданса от частоты для широкополосного фильтра представлен на рисунке 1.23. Частота настройки фильтра соответствует 5 гармонике.

Добротностью Q широкополосного фильтра высших гармоник C -типа на частоте настройки f_n определяется по формуле (1.9):

$$Q = \frac{R}{(L \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_n)} \quad (1.9)$$

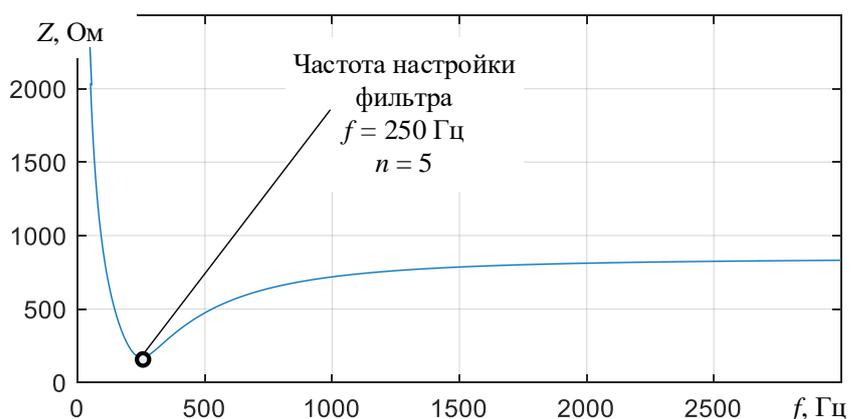


Рисунок 1.23 – График зависимости импеданса от частоты, полученный для широкополосного фильтра высших гармоник C -типа

Многочастотные фильтры (рисунок 1.18, е) применяются для фильтрации гармоник в широком диапазоне гармонического состава и применяется, например,

для фильтрации гармоник, создаваемых синхροфазотроном, система электроснабжения которого подключена к объединенной энергосистеме Франции.

Для исследования применения традиционных фильтров с целью устранения искажений напряжения распределительной сети и фильтрации гармоник, вследствие работы нелинейной нагрузки - источника высокочастотных гармоник, в программе Matlab с приложением Simulink была разработана имитационная модель. Смоделирована работа 4-х типов традиционных фильтров:

1. Один фильтр однополосный (F1), настроенный на 7 гармонику, номинальной мощностью 150 МВАр, имеющий добротность $Q=30$.

2. Один фильтр широкополосный С-типа (F2), настроенный на 5 гармонику, номинальной мощностью 150 МВАр, имеющий добротность $Q=2$.

3. Один фильтр двухполосный (F3), настроенный на 11 и 13 гармонику, номинальной мощностью 150 МВАр, имеющий добротность $Q=20$.

4. Один фильтр широкополосный (F4), настроенный на 23 гармонику, номинальной мощностью 150 МВАр, имеющий добротность $Q=7$.

На рисунке 1.24 представлена результирующая частотная характеристика сети и сопротивление системы (импеданс) без использования ФКУ и при включении группы, состоящей из 4-х фильтров.

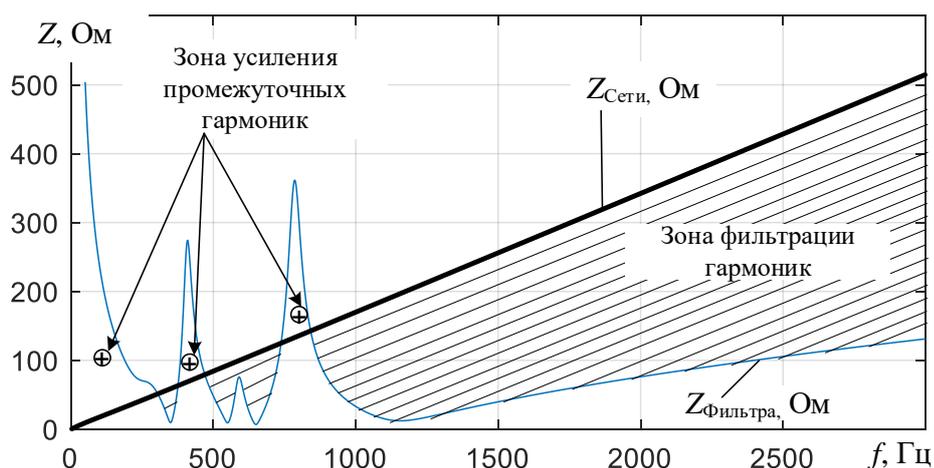


Рисунок 1.24 – Частотные характеристики эквивалентного сопротивления Z_{ϕ} 4-х типов традиционных ФКУ и сопротивление сети Z_c

Область фильтрации заштрихована. Область усиления гармоник (резонансный пик) имеет знак «+». На частотах настройки ФКУ обладают

фильтрующим эффектом, поскольку мнимая часть эквивалентного сопротивления группы фильтров на этих частотах равна нулю [87-92]. На промежуточных частотах расположены полюсы частотной характеристики, что соответствует эффекту параллельного резонанса, создаваемого смежными фильтрами. В области частот $\nu = 2-15$ наблюдаются резонансные пики, превышающие уровень частотной характеристики сети. Вследствие этого, на данных частотах вместо фильтрации гармоник происходит усиление гармоник тока нелинейной нагрузки. В результате увеличиваются гармоники тока, попадающие в распределительную сеть. Частота первого резонанса, лежащего слева от 7-ой гармоники, находится настолько близко к ней, что при возможном смещении частоты сети или частоты настройки ФКУ за счет изменения емкости конденсаторов, вместо ослабления 7-ой гармоники будет происходить ее усиление. Поэтому частоту настройки ФКУ, в данном случае однополосного фильтра 7-ой гармоники, целесообразно сместить немного влево и установить частоту настройки фильтра 345 Гц, а не 350 Гц.

Как было сказано выше, между частотами настройки фильтров расположены зоны промежуточных частот с резонансными пиками. Резонансы на промежуточных частотах могут приводить к перегрузке фильтров и появлению в сети значительных гармоник промежуточных частот. С целью ослабления таких эффектов в отдельные одночастотные фильтры вводят демпфирующие резисторы, однако положительный эффект уменьшения резонансных пиков сопровождается увеличением потерь в этих фильтрах. Поэтому в ФКУ $\nu = 2 - 7$ гармоник, эти резисторы стараются включать между эквипотенциальными на частоте сети точками: между отводом промежуточной точки батареи и внешним выводом реактора (рисунок 1.18 г). При данной схеме подключения, демпфирующий резистор шунтирует реактор L и часть конденсаторной батареи C_2 . Величина C_2 выбирается из условия эквипотенциальности точек включения на частоте сети:

$$\omega_1 \cdot L - \frac{1}{\omega_1 \cdot C_2} = 0 \quad \text{или} \quad \omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C_2}}, \quad (1.10)$$

где ω_1 – частота сети, Гц.

При данном условии напряжение, приложенное к сопротивлению R на частоте сети, равно нулю и потерь в нем на этой частоте нет. На других частотах условие по формуле (1.10) не выполняется, чем и объясняется демпфирующий эффект сопротивления R на частотах параллельного резонанса. Следствием этого эффекта является снижение резонансных пиков.

Основными недостатками двухчастотных и более сложных фильтров является высокая стоимость данного оборудования (по сравнению с одночастотными узкополосными фильтрами), сложность настройки и чувствительность к отклонениям параметров отдельных элементов, а также большие габариты оборудования, в связи с чем, нужны более большие площади под размещение ФКУ [93-95]. Поэтому наиболее часто применяются одночастотные фильтры (рисунок 1.18 а).

Зачастую применение одночастотных традиционных фильтров для устранения сильных искажений напряжения на секциях 6-35 кВ не оказывает должного эффекта. Расчет основных параметров, настройка и установка традиционных фильтров выполняются на конкретные гармоники, которые необходимо фильтровать. Такой способ устранения гармоник малоэффективен и имеет большие капитальные затраты, поскольку необходимо большое количество одночастотных фильтров, каждый из которых рассчитан на определённую гармонику. Установка данных фильтров сопровождается дополнительными паразитными резонансами тока, которые усиливают промежуточные гармоники. Данные гармоники многократно усиливают колебания и сильно искажают форму напряжения (рисунок 1.25 б) при наложении частотной характеристики распределительной сети с областью высокочастотных гармоник (рисунок 1.25 а), генерируемых современными ПЧ-АВ [1, 15, 20-24, 93-96].

Такие ситуации часто возникают в системах внутривозовского электроснабжения металлургических заводов с одной ГПП и протяженными распределительными кабельными сетями среднего напряжения.

Проводя анализ литературы [18, 22, 97-111], был обнаружен иной способ борьбы с высокочастотными гармониками. В работе [18] рассмотрена проблема ЭМС ПЧ-АВ с питающей сетью на медной шахте Los Pelambres.

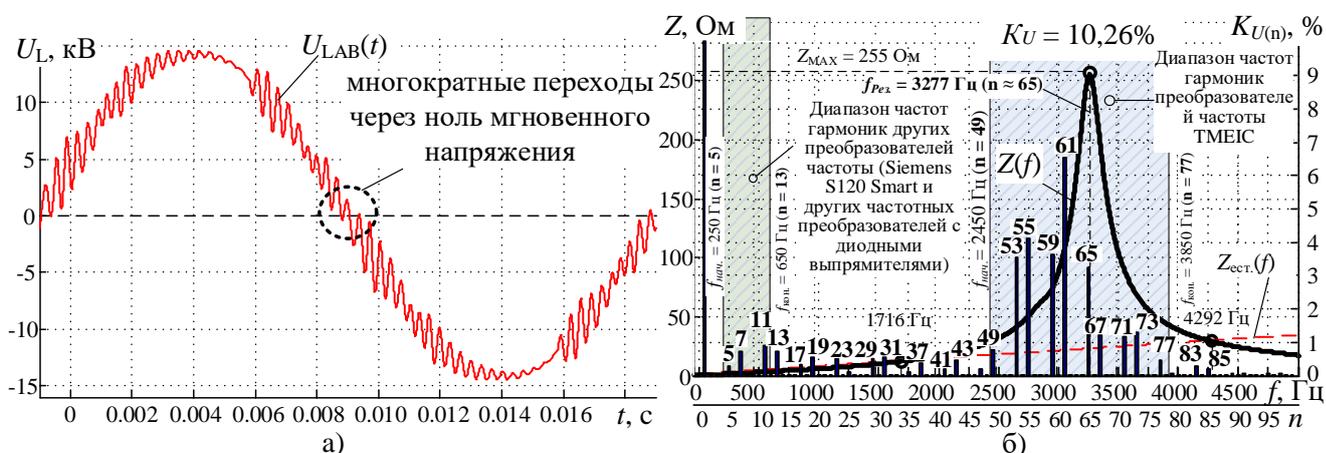


Рисунок 1.25 - (а) Мгновенные значения линейного напряжения АО «Металлургический завод Балаково»; (б) Гармонический состав линейного напряжения, частотная характеристика сети 10 кВ при использовании традиционных ФКУ

Преобразователи частоты нашли применение в электроприводах конвейеров, транспортирующих руду от шахты на высоте 3400 м вниз до обогатителя.

На рисунке 1.26 представлена однолинейная схема системы электроснабжения Los Pelambres. Применение ПЧ-АВ позволило осуществлять рекуперацию электрической энергии в сеть при транспортировке руды. На конвейерах применяются 8 электродвигателей 2,9 кВ мощностью 2500 кВт каждый. Подача электроэнергии на шахту осуществляется по двум протяжённым линиям 220 кВ [18].

Электроприводы получают питание от понизительного трансформатора 220/23 кВ мощностью 60 МВА. Электроприводы конвейеров 5 и 6 имеют в своём составе 3 ПЧ-АВ, конвейера 7 - только 2. Два циклоконвертера питают синхронные двигатели шаровых мельниц обогатителя. Каждый циклоконвертер имеет на входе двухветвевой фильтр верхних частот общей мощностью 9 МВАр, настроенный на 5 и 9,5 гармоники для улучшения результирующего гармонического состава. Выбор 5 и 9,5 гармоник был определен проектировщиками как наиболее значимые гармоники, и, при удалении данных

гармоник, суммарная частотная характеристика сети должна была снизиться до приемлемого уровня [18, 22].

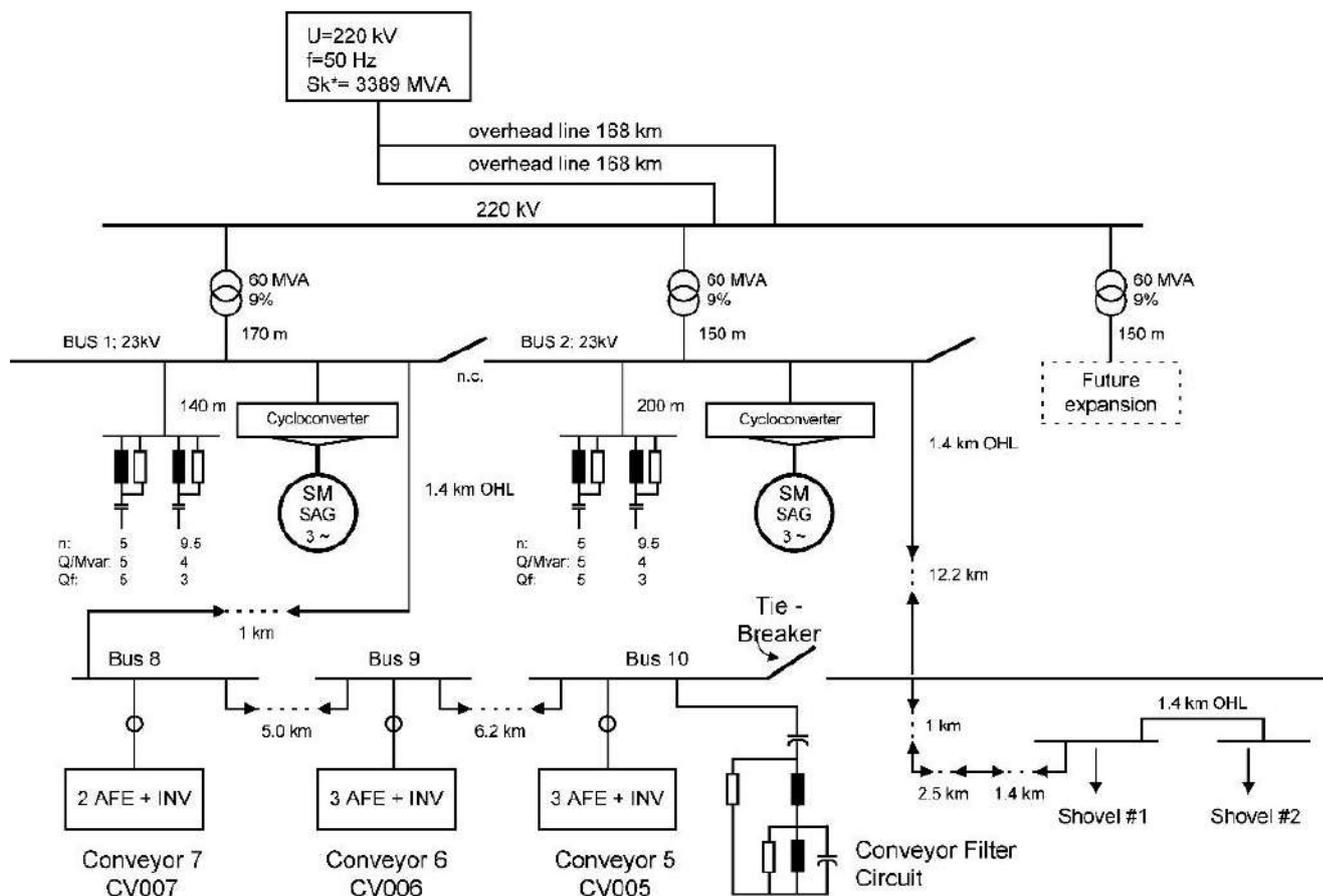


Рисунок 1.26 – Упрощённая однолинейная схема системы электроснабжения шахты Los Pelambres

Однако, из-за применения АВ с применением ШИМ с селективным устранением гармоник (SHEPWM) и 12-пульсной конфигурации электропривода конвейера №7, на первичной стороне его понизительного трансформатора присутствуют гармоники начиная с 23 (1150 Гц) и 25 (1250 Гц), рисунок 1.27. Эти гармоники попадают в зону экстремума (1300 Гц) импеданса частотной характеристики сети и приводит к сильным искажениям напряжения на секции шины 10.

Резонансные явления в распределительной сети шахты возникают из-за взаимодействия индуктивности понизительных трансформаторов и суммарной емкости протяжённых кабельных линий (длины кабелей указаны на рисунке 1.26). В результате происходит значительное ухудшение качества напряжения в распределительной сети предприятия при работе конвейеров. Это в свою очередь

сказывается на работе других потребителей электроэнергии и надежности электроснабжения завода в целом. Существующие ФКУ не справляются со своей задачей, а только усугубляют ситуацию [18, 22].

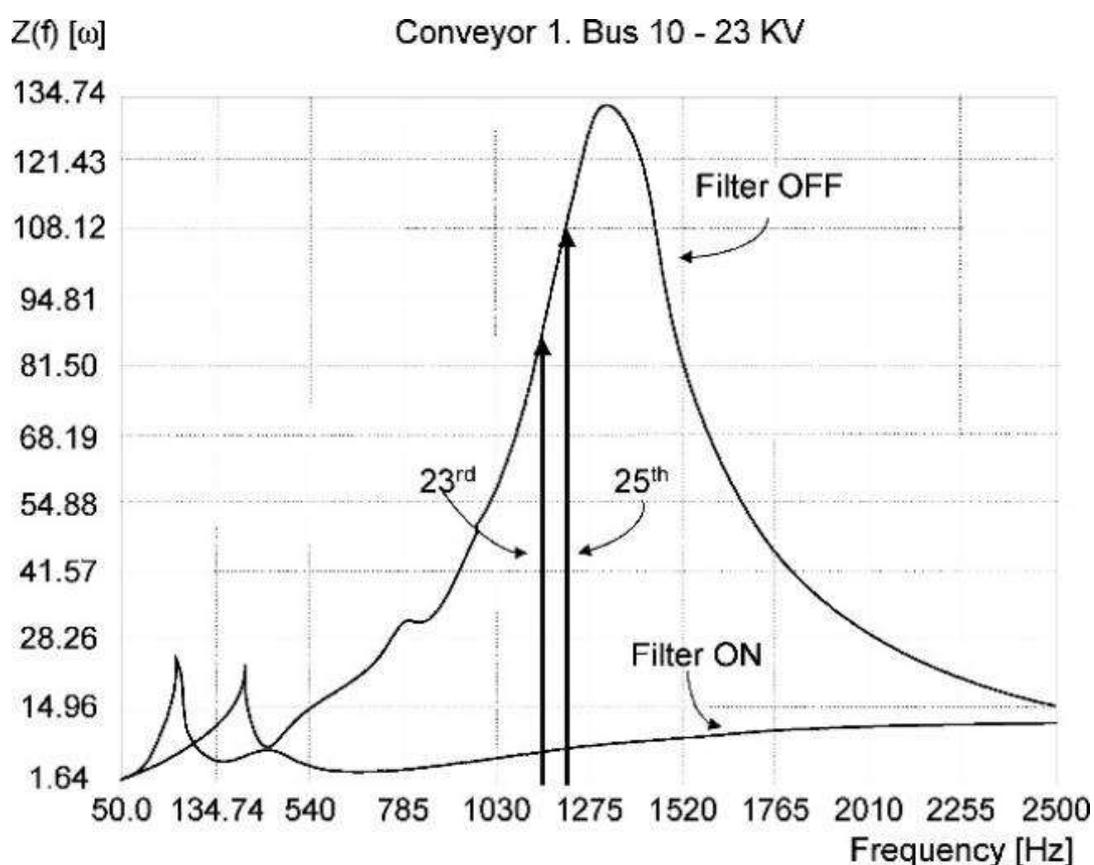


Рисунок 1.27 – Частотная характеристика сети шахты Los Pelambres относительно шин секции 10

Для поддержания уровня гармоник напряжения в пределах работы Rodríguez и др. был спроектирован и включен двухчастотный фильтр конвейерного типа на 9 МВАр, настроенными на 5,5-ю и 12-ю гармонику. Структура фильтра гармоник была выбрана в виде схемы двухчастотного фильтра с двойной настройкой, чтобы минимизировать общий объем устройства из-за малого доступного пространства помещения. Фильтр должен устранять результирующий резонанс на частоте 1300 Гц и искажения во всем диапазоне ожидаемых гармоник. Для проектирования фильтра, авторами был проведен полный гармонический анализ промышленной энергосистемы. Точная настройка около 5,5-го и 12-го порядков является результатом компромисса между уменьшением гармонических искажений при шестипульсном режиме (5-й, 7-й, 11-й и 13-й гармоники) и предотвращением

негативных эффектов на стандартных гармонических частотах, а именно 2-я, 3-я и 4-я гармоники [18]. На рисунке 1.18 д показана структура фильтра. Фильтр конвейерного типа подключается к секции шины 10, как показано на рисунке 1.26. Использование фильтра резко снижает и изменяет частотную характеристику секции шины 10 и наглядно показано на рисунке 1.27.

Однако авторами не раскрыта суть методики выбора параметров, частоты настройки, схемы соединения, типа ФКУ и влияние этих составляющих на смещение частотной характеристики с целью исключения резонанса.

1.4. Выводы по главе

1. Наличие в системах электроснабжения металлургических предприятий протяженных распределительных сетей среднего напряжения с высоким значением эквивалентной емкости кабельных линий создает условия для появления резонансов токов в области генерирования гармоник мощными преобразователями частоты с активными выпрямителями.

Сложность выявления резонансных явлений в условиях действующего производства вызвана периодическим изменением схемы электроснабжения электроприемников за счет проведения оперативных переключений на электрической подстанции. В зависимости от количества подключенных кабельных линий создаются условия для появления резонанса, совпадающего с частотной областью высших гармоник, генерируемых мощными активными выпрямителями преобразователей частоты. Отсутствие четкого понимания условий возникновения сильных искажений напряжения является серьезной проблемой для электротехнического персонала заводской подстанции и цехов предприятия, поскольку аварийные выходы из строя силовых преобразователей электроприводов могут происходить при неудачном сочетании включенных ячеек на главной понизительной подстанции. Таким образом, в настоящее время существует комплексная проблема обеспечения электромагнитной совместимости мощных электроприводов промышленных механизмов на базе ПЧ-АВ с питающей сетью среднего напряжения 6-35 кВ, а также обеспечения надежности работы данных электроприводов при возмущениях со стороны внешней питающей сети.

2. Несмотря на известные способы обеспечения ЭМС ПЧ-АВ с использованием, например, модифицированных алгоритмов ШИМ (диссертационная работа Буланова М.В. [26, 27]) и усовершенствованных систем автоматического управления АВ (диссертационная работа Гилемова И.Г. [28, 29]), проблема в настоящее время полностью не решена, поскольку, в некоторых случаях реализация вышеуказанных технических решений затруднена из-за закрытости систем управлений АВ и необходимости привлечения специалистов со стороны производителей силовой преобразовательной техники для изменения алгоритмов управления АВ.

3. Использование схем электроснабжения, предусматривающих выделение «грязной» секции в РУ-6-35 кВ ГПП предприятия для индивидуального питания электроприводов на базе ПЧ-АВ для улучшения ЭМС ПЧ-АВ с внутризаводской распределительной сетью на действующем производстве, будет сопряжено со значительными затратами времени и ресурсов на переключения кабельных линий и изменения компоновки распределительных устройств ГПП. Либо, при ограниченной мощности трансформаторов на ГПП, могут оказаться вообще не реализуемыми. Использование L-C-L-фильтров на входе силового преобразователя не всегда реализуемо из-за отсутствия технической возможности подключения данных фильтров на вход мощного ПЧ-АВ среднего напряжения. Фильтры данного типа используются главным образом в электроприводах с ПЧ-АВ малой и средней мощности низкого напряжения.

4. Применение традиционных фильтров высших гармоник для улучшения ЭМС мощных ПЧ-АВ с распределительной сетью 6-35 кВ, зачастую, не целесообразно и не оказывает должного воздействия, а в определенных случаях может даже усугубить ситуацию с качеством напряжения, поскольку сопровождается дополнительными паразитными резонансами тока, которые усиливают промежуточные гармоники. Данные гармоники многократно усиливают колебания и сильно искажают форму напряжения при наложении частотной характеристики распределительной сети с областью высокочастотных гармоник генерируемых современными ПЧ-АВ.

5. Применение сложных типов ФКУ, таких как: двухчастотные, широкополосные, широкополосные С-типа, двухчастотные конвейерного типа, в ряде случаев дает достижение необходимого эффекта по улучшению качества электроэнергии в электрических сетях с ПЧ-АВ большой мощности. Однако данные типы ФКУ имеют следующие существенные недостатки, а именно: сложность в исполнении, высокая стоимость, большие габариты оборудования, сложность настройки фильтров на необходимые гармоники и высокая чувствительность к отклонениям параметров, не всегда эффективны с точки зрения технико-экономического расчета. Также в работах, где описывается применение подобных фильтров, отсутствует описание методики выбора параметров ФКУ, таких как: мощность, индуктивность, емкость, добротность, частота настройки и др., а также определение типа, обоснование структурной схемы фильтра.

6. На сегодняшний день применение одночастотных фильтров для коррекции частотных характеристик сетей 6-35 кВ для смещения опасного резонанса тока, имеющего наложение с высокочастотными гармониками тока мощных ПЧ-АВ, не изучено должным образом. Актуальной задачей является исследование возможности применения специализированных пассивных фильтров – одночастотных фильтров с высокой добротностью для улучшения качества электроэнергии в сетях 6-35 кВ с мощными электроприводами на базе ПЧ-АВ, а также разработка методики выбора мощности и расчета емкостей и индуктивностей данных фильтров.

ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИСТЕМЕ ВНУТРИЗАВОДСКОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ 10 КВ АО «МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ ЗАВОД БАЛАКОВО» С МОЩНЫМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ НА БАЗЕ ПЧ-АВ

2.1. Анализ структуры системы электроснабжения электроприемников 10 кВ АО «Металлургический завод Балаково»

Упрощенная схема электроснабжения завода АО «Металлургический завод Балаково» приведена на рисунке 2.1.

На схеме можно выделить главную понизительную подстанцию предприятия ГПП 220/35/10 кВ, от которой получают питание электросталеплавильный комплекс «шахтная печь – агрегат ковш печь – статический тиристорный компенсатор» и остальные электроприемники электросталеплавильного и сортопрокатного цехов, а также других вспомогательных объектов, таких как: участки газоочистки и водоподготовки, скрапное отделение, блок разделения воздуха [1, 15].

Закрытое распределительное устройство подстанции ЗРУ-220 кВ включает в себя две системы сборных шин 220 кВ, к которым подходят две линии воздушной ЛЭП от районной подстанции ПС «Центральная». Благодаря текущей схеме ЗРУ-220 кВ с использованием шинных разъединителей и шиносоединительного выключателя обеспечиваются заданная надежность электроснабжения завода и гибкость при проведении ремонта и обслуживания ЛЭП, а также оборудования 220 кВ. Текущей схемой электроснабжения предусмотрено три сетевых трансформатора: Т1 и Т2 50 МВА 220/10 кВ, осуществляющих питание секций ЗРУ-10 кВ, а также Т3 220/35 кВ 110/170 МВА, питающего электросталеплавильный комплекс завода.

ЗРУ-10 кВ состоит из трех секций. Секция №1 получает питание от сетевого трансформатора Т1, соответственно секция №2 – от трансформатора Т2. Секция Т получает питание по независимым линиям 10 кВ от главного распределительного устройства (ГРУ) ТЭЦ-4, расположенной в непосредственной близости от завода.

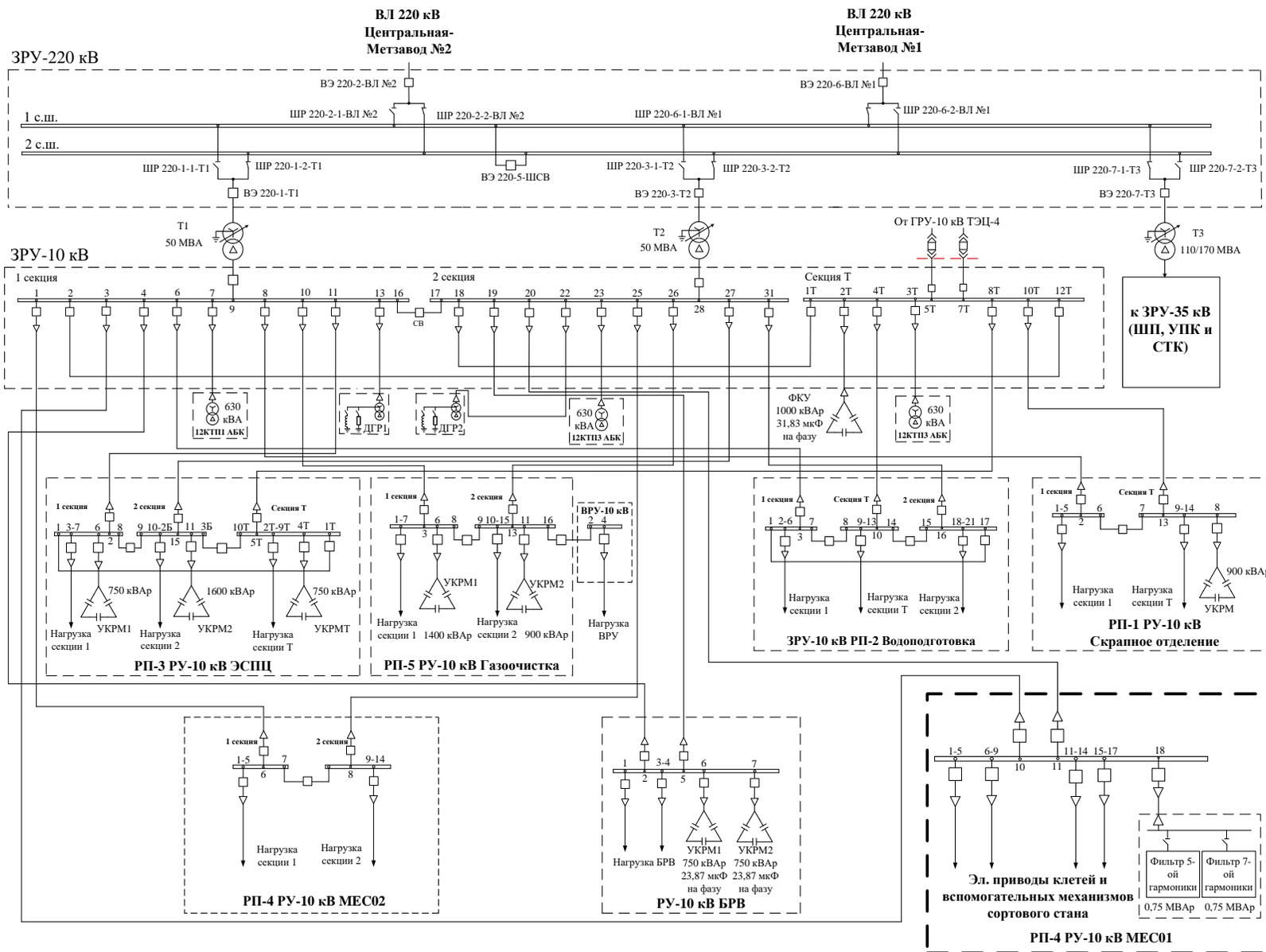


Рисунок 2.1 - Схема электроснабжения электроприемников 10 кВ АО «Металлургический завод Балаково»

В нормальном режиме работы связь секций №1 и №2 с секцией Т не предусмотрена. В зависимости от выбранной схемы электроснабжения (раздельная или совместная работа секций №1 и №2) выбирается состояние секционного выключателя СВ. На секциях №1 и №2 ЗРУ-10 кВ установлено оборудование для заземления нейтрали в виде дугогасящих реакторов (ДГР) и резисторов, предназначенное для компенсации емкостных токов однофазного замыкания на землю (ОЗЗ) и ограничения перенапряжений при ОЗЗ.

От секций №1 и №2 ЗРУ-10 кВ по кабельным линиям получают питание распределительные устройства РУ-10 кВ следующих цеховых РП: 1) РП-1 «Скрапное отделение», 2) РП-2 «Водоподготовка», 3) РП-3 «ЭСПЦ», 4) РП-4 МЕСО1 «Главные электроприводы сортопрокатного цеха»; 5) РП-4 МЕСО2 «Вспомогательное электрооборудование сортопрокатного цеха»; 6) РП-5 «Газоочистка». Также от секций ЗРУ-10 кВ питается блок разделения воздуха (БВР), относящийся к стороннему предприятию ООО «Эр Ликид (Air Liquid) Балаково», где осуществляется производство кислорода, азота и аргона для целей АО «Металлургический завод Балаково». Каждое РУ-10 кВ цеховых РП имеет два ввода от секций ЗРУ-10 кВ – основной и резервный. Использование того или иного ввода определяется выбранной конфигурацией внутризаводского электроснабжения 10 кВ [32].

На рисунке 2.2 приведена схема электроснабжения главных приводов сортового стана АО «Металлургический завод Балаково». От РП-4 (МЕСО1) получают питание электроприводы 18 клетей с приводными двигателями 630 – 1300 кВт, электроприводы трех скоростных проволочных блоков (СПБ) с двигателями большой мощности 2500 кВт (СПБ №1 и №2) и 6300 кВт (СПБ №3), а также электроприводы ножниц и правильной машины мощностью 290 – 600 кВт. Понижительные трансформаторы Т4-Т7, Т9-Т12 и Т19 типа ОТН 3500 кВА 10/0,72 кВ осуществляют питание групповых выпрямительных модулей Siemens Sinamics серии S120, которые питают несколько отдельных групп инверторов Siemens Sinamics S120 с подключенными на выходе асинхронными двигателями клетей №№1-18, ножниц и правильной машины.

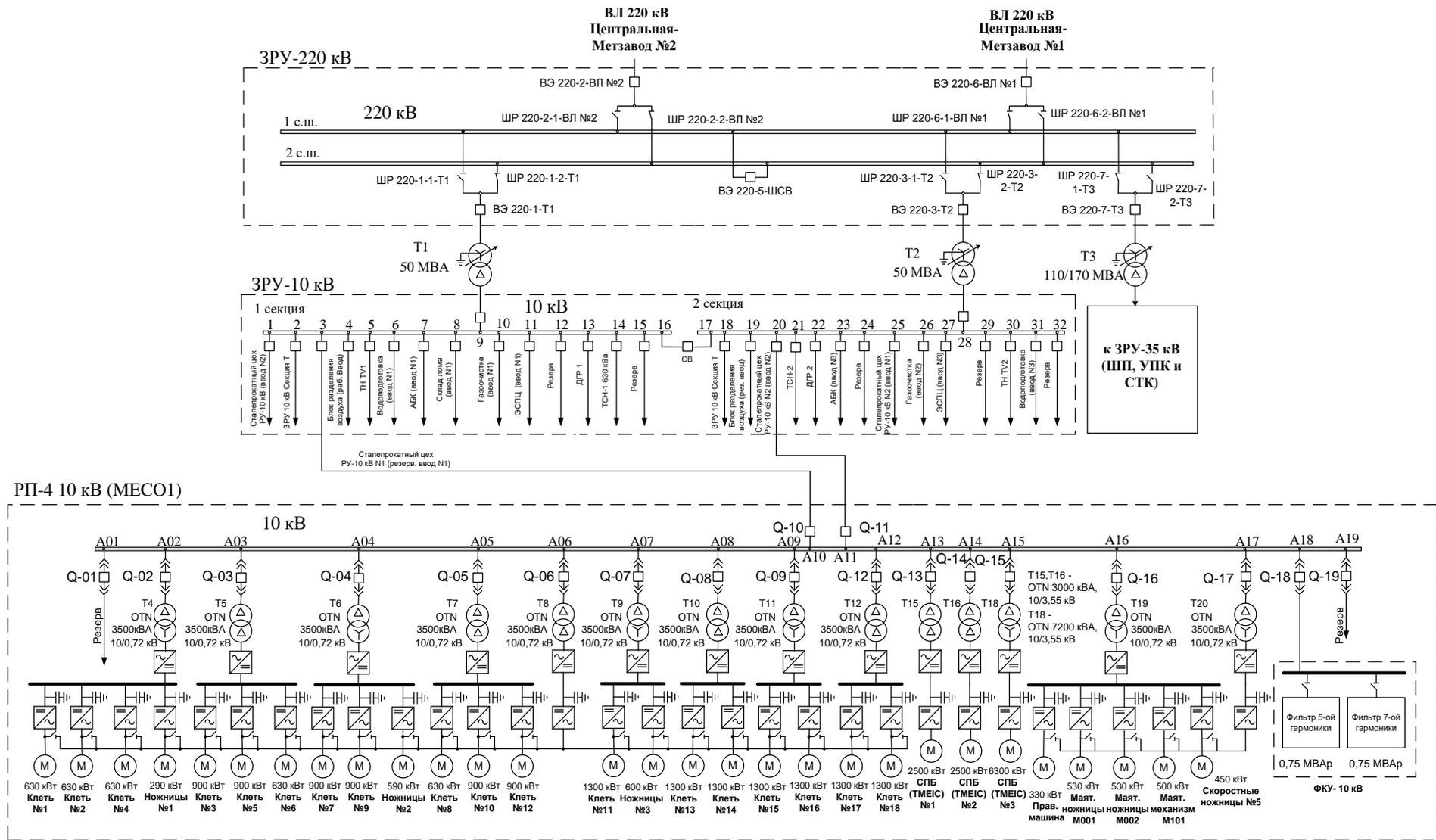


Рисунок 2.2 - Схема электроснабжения главных приводов сортового стана АО «Металлургический завод Балаково»

Трансформаторы Т8 и Т20 ОТН 3500 кВА 10/0,72 кВ питают резервные преобразователи частоты, предназначенные для питания приводных двигателей клеток или ножниц в случае выхода из строя отдельных инверторов. Трансформаторы Т15 – Т18 питают ПЧ производства ТМЕИС ТМdrive-70 с мощными асинхронными двигателями 2500 кВт (ТМЕИС №№1-2) и 6300 (ТМЕИС №3) скоростных проволочных блоков №№1-3.

Цеховая РП-4 имеет одну секцию 10 кВ из-за чего нет возможности отдельного питания отдельных групп электроприводов. Имеются две питающие линии от ЗРУ-10 кВ ГПП. В нормальном режиме задействована кабельная линия №2, подключенная к секции №2 ЗРУ-10 кВ (ф. 20). Также к шинам РП-4 подключено ФКУ-10 кВ, состоящее из резонансных фильтров 5 и 7 гармоник, которые предназначены для фильтрации соответствующих гармоник тока, генерируемых в сеть выпрямительными модулями Siemens и ТМЕИС.

Электрической нагрузкой РП-1, РП-2, РП-3, РП-4 МЕСО2, РП-5 и БВР являются комплектные трансформаторные подстанции и отдельные понизительные трансформаторы 10/0,4 кВ, от которых получают питание различные низковольтные электроприводы кранов, насосов и других многочисленных механизмов электросталеплавильного и сортопрокатного цехов, отделений водоподготовки и газоочистки, скрапного участка и т.д. Также присутствует большое количество высоковольтных сетевых двигателей 10 кВ механизмов дымососов и компрессоров, функционирующих в различных цехах.

Для компенсации реактивной мощности электроприемников и обеспечения желаемого коэффициента мощности на границе балансовой принадлежности электрических сетей завода и электроснабжающей организацией в цеховых РУ-10 кВ установлены устройства компенсации реактивной мощности (УКРМ) в виде высоковольтных батарей конденсаторов. Параметры УКРМ приведены в таблице 2.1. Кроме того, в некоторых цехах имеются регулируемые устройства компенсации реактивной мощности низкого напряжения 0,4 кВ. Необходимо отметить, что в настоящее время все УКРМ-10 кВ выведены из работы ввиду неэффективности их применения [1, 15, 32].

Исполнение силовых схем УКРМ для РП-1-РП-3-РП-5 представлено на рисунке 2.3. Используются батареи конденсаторов, которые соединены последовательно с реактором на магнитном сердечнике с зазором (рисунок 2.3).

Таблица 2.1 - Устройства компенсации реактивной мощности 10 кВ в виде высоковольтных батарей конденсаторов, установленные в РУ-10 кВ цеховых РП

Наименование РП	Количество и мощность УКРМ	Исполнение УКРМ
РП-3 ЭСПЦ	УКРМ1 – 750 кВАр, УКРМ2 – 1600 кВАр, УКРМТ – 750 кВАр (ООО «СлавЭнерго»)	Включенные параллельно секции 300 или 150 кВАр из батарей конденсаторов, соединенных с реактором на магнитном сердечнике со значительной индуктивностью $L_p = 66 - 132$ мГн, образующие фильтры 5-ой гармоники и имеющие частоту расстройки 189 Гц.
РП-5 Газоочистка	УКРМ1 – 1400 кВАр, УКРМ2 – 900 кВАр, (ООО «СлавЭнерго»)	
РП-1 Скрапное отделение	УКРМ – 900 кВАр (ООО «СлавЭнерго»)	
РП-4 МЕСО1	ФКУ-1,2 – фильтры 5 и 7 гармоник	Узкополосные резонансные фильтры с частотами настройки 245 и 344 Гц, предназначенные для фильтрации гармоник ПЧ.

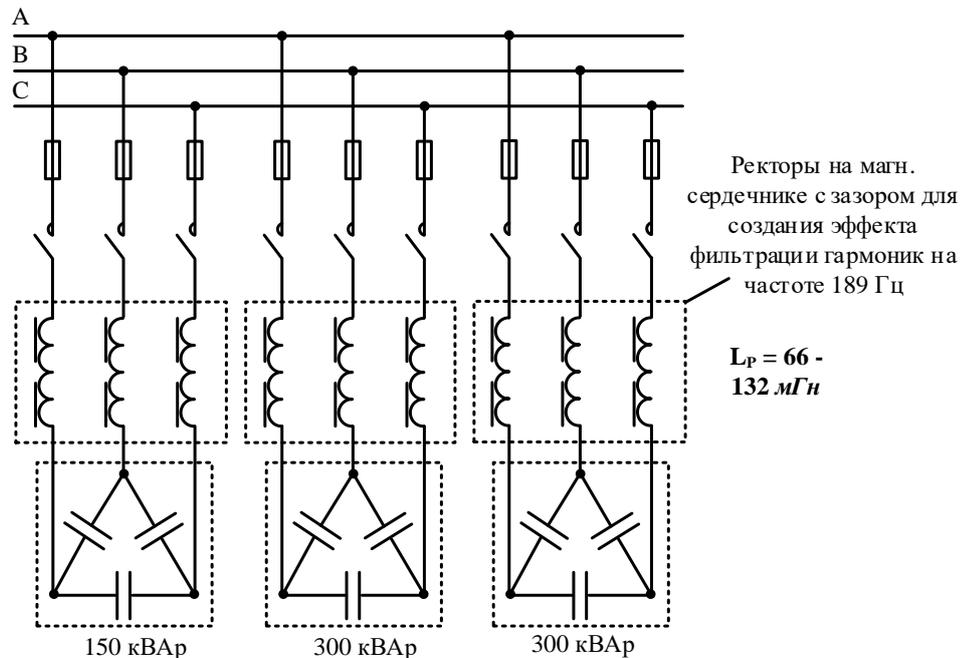


Рисунок 2.3 - Электрические схемы различных типов УКРМ, установленных в РП-3 и РП-5

Также необходимо отметить, что в РП-4 МЕСО1 используются ФКУ, представляющие собой узкополосные фильтры 5 и 7 гармоник. Фильтры предназначены для минимизации высших гармоник низкочастотного диапазона в напряжении 10 кВ при работе преобразователей частоты электроприводов сортового стана [1, 15, 32]. Данные ФКУ обладают высокой добротностью на частотах настройки. Устройства оказывают незначительное влияние на резонансные явления в сети 10 кВ в области высоких частот.

Важной особенностью системы внутривозовского электроснабжения электроприемников 10 кВ является большое количество кабельных линий, подключенных общему ЗРУ-10 кВ [32, 40]. Суммарная длина линий, подключенных к ЗРУ-10 кВ (секции №1 и №2), с учетом КЛ, отходящих от цеховых РП, превышает 18 км. В приложениях А и Б приведена подробная информация по кабельным линиям, отходящим от секций ЗРУ-10 кВ и цеховых РП.

2.2. Исследование силовой схемы и алгоритмов функционирования ШИМ активных выпрямителей преобразователей TMEIC TMdrive-70

Электроприводы скоростных проволочных блоков СПБ №1,2,3 выполнены по схеме индивидуальный преобразователь частоты – асинхронный двигатель. Преобразователи фирмы Toshiba Mitsubishi-Electric Industrial Corporation (TMEIC TMdrive-70) получают питание от сети 10 кВ РП-4 через силовые трансформаторы, основные параметры которых приведены в таблице 2.2. Первый и второй СПБ оснащены двигателями мощность 2500 кВт, третий скоростной блок – двигателем мощностью 6300 кВт [32, 40].

Преобразователи TMEIC (рисунок 2.4) состоят из активного выпрямителя (IEGT converter) и инвертера (IEGT inverter), выполненных по трехуровневой схеме – звено постоянного тока представляет собой последовательное соединение двух конденсаторов со средней точкой.

Каждая фаза активного выпрямителя выполнена в виде последовательного соединения 4-х высоковольтных IEGT транзисторов.

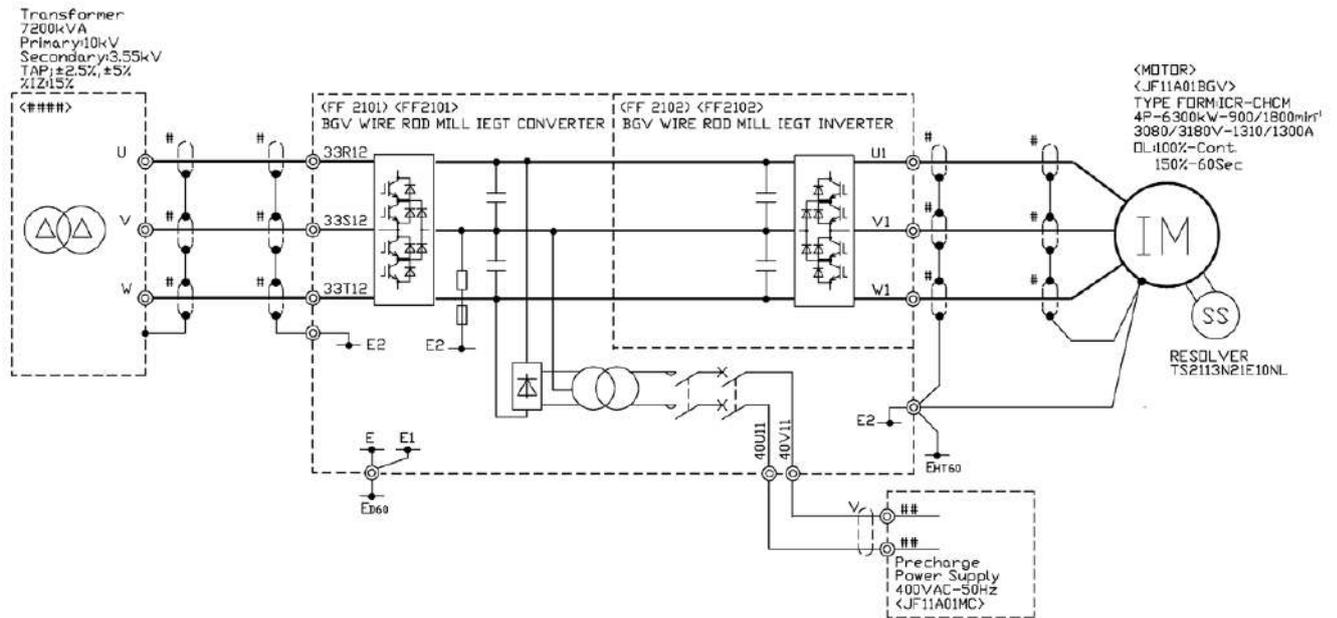


Рисунок 2.4 - Силовая схема преобразователя частоты ТМЕИС

Таблица 2.2 - Основные технические данные преобразовательных трансформаторов Т15, Т16 и Т18

Наименование	Величина	Единицы измерения
Т15, Т16 (СПБ №1 и №2)		
Тип	OTN	
Номинальная мощность	3000	кВА
Частота	50	Гц
Номинальное напряжение:		
обмотка ВН	10 ±2x2,5%	кВ
обмотка НН	3,55	кВ
Группа соединения	Dd0	
Напряжение короткого замыкания	14,94	%
Т18 (СПБ №3)		
Тип	OTN	
Номинальная мощность	7200	кВА
Частота	50	Гц
Номинальное напряжение:		
обмотка ВН	10 ±2x2,5%	кВ
обмотка НН	3,55	кВ
Группа соединения	Dd0	
Напряжение короткого замыкания	14,87	%

Их средний зажим присоединен к вторичной обмотке трансформатора, два крайних – к положительной и отрицательной шинам звена постоянного тока, а два промежуточных зажима с помощью двух дополнительных диодов присоединены к средней точке двух конденсаторов. Подобное схемотехническое решение позволяет при использовании транзисторов класса 4500 В поддерживать напряжение в звене постоянного тока на уровне 4860 В за счет того, что к каждому транзистору прикладывается лишь половина этого напряжения [3]. Трехуровневую схему называют ввиду того, что в кривой фазного напряжения (относительно средней точки конденсаторов) присутствуют три уровня: -2430 В, 0 В и $+2430$ В. Увеличение числа уровней напряжения относительно традиционных двухуровневых схем дает улучшение в 2 раза гармонического состава тока, потребляемого из сети. Это особенно актуально для мощных преобразователей частоты, у которых очень низкая частота переключения ключей (250 Гц (частота ШИМ)), поскольку при такой частоте ШИМ кривая тока сильно искажена по отношению к синусоиде.

Ключевым вопросом обеспечения электромагнитной совместимости преобразователя частоты на базе активного выпрямителя с питающей сетью является метод широтно-импульсной модуляции ШИМ. В преобразователях фирмы TMEIC серии TMdrive-70 применяются два способа, в зависимости от уровня входного напряжения:

3100 В – классический метод ШИМ (Conventional PWM), основанный на сравнении задающего синусоидального сигнала с опорным напряжением пилообразной формы;

3550 В – метод ШИМ с фиксированными значениями углов переключения (Fixed Pulse Pattern Control).

Основные данные по преобразователям TMEIC приведены в таблице 2.3.

Поскольку напряжение вторичных обмоток преобразовательных трансформаторов T15, T16 и T18 составляет величину 3,55 кВ, то именно второй способ используется на стане металлургического предприятия АО «Металлургический завод Балаково».

В описании этого метода, представленном фирмой TMEIC, говорится, что углы переключения силовых ключей (транзисторов) рассчитываются заранее, т.е. не в режиме реального времени, как это происходит в классическом методе ШИМ, и хранятся в памяти контроллера. Совокупность углов переключения определяет так называемый коэффициент модуляции – он связывает напряжение звена постоянного тока с напряжением на входных зажимах активного выпрямителя. В данном методе этот коэффициент – величина постоянная, тогда как в классическом – зависит от режима работы [32, 40].

Таблица 2.3 - Основные технические данные преобразователей TMEIC

Наименование	Величина	Единицы измерения.
Номинальное напряжение звена постоянного тока	$2 \times 2430 = 4860$	В
Суммарная емкость (трех фаз, выпрямителя и инвертера) между средней точкой и положительной/отрицательной шиной	$(3+3) \times 2800 = 16800$	мкФ
IGBT транзистор:		
ток	2100	А
напряжение	4500	В
Обратный диод:		
ток	1500	А
напряжение	4500	В

Также в описании говорится о критерии, по которому производится расчет углов переключения – в основе лежат минимизация потерь в IGBT транзисторах и ограничение высших гармоник тока, генерируемых в сеть (IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems (IEEE 519) [4]. Фирма TMEIC в своей технической документации не приводит совокупность углов переключений, тем не менее, в 3 главе представлена методика, позволяющая по экспериментальным данным восстановить указанные углы. Расчет высших гармоник напряжения на шинах 10 кВ РП-4 невозможно провести, не имея в распоряжении указанных углов переключения. Экспериментальное определение углов переключения подробно описано в 3 главе диссертационной работы.

2.3. Обработка результатов экспериментальных исследований показателей качества электроэнергии в сети 10 кВ внутризаводского электроснабжения завода

Экспериментальные исследования показателей качества электроэнергии в сети 10 кВ внутризаводского электроснабжения проводились с помощью двух регистраторов:

1. Elspec G4420 – регистратор показателей качества электрической энергии, прибор позволяет измерять и регистрировать основные показатели энергопотребления в трехфазных сетях: мгновенные и действующие значения напряжения и тока при синусоидальной и искаженной форме кривой, активную и реактивную мощность; отдельные гармоники кривой напряжения и тока (до 512 по напряжению). Подключение прибора по напряжению осуществляется на зажимы штатных трансформаторов напряжения (100 В), установленных в ячейках распределительных устройств; по току – в приборе предусмотрено бесконтактное измерение тока, подаваемого со штатных трансформаторов тока конкретной ячейки. Прибор способен осуществлять регистрацию в течение длительных промежутков времени (дни, недели) во встроенную память. Программное обеспечение, поставляемое вместе с прибором, дает возможность выбрать из списка необходимые для исследования показатели качества электроэнергии, задать временной интервал, на котором будет осуществляться анализ. Прибор осуществляет пассивную запись сигналов, после чего по требуемым показателям качества, например, по коэффициенту нелинейных искажений кривой напряжения или амплитуде конкретной высшей гармоники, возможно в записанной информации найти интересующий пользователя аварийный или нормальный режим работы.

2. FLASH-Recorder - портативный регистратор аналоговых сигналов, прибор позволяет записывать с высокой частотой дискретизации (100 кГц – один канал, 50 кГц – два канала) сигналы, подаваемые на входы. Пользователь в режиме реального времени может на экране компьютера наблюдать форму кривых и их спектральный состав. Сохранение сигналов производится на жесткий диск

компьютера. Подключение прибора по напряжению производится с помощью делителя напряжения TT-SI 9010A (коэффициент 1:100) фирмы Testec, по току – с помощью бесконтактных токовых клещей Fluke i400s (предел 40 А, коэффициент 10 мВ/А). Данный регистратор незаменим при проведении активных экспериментов, когда необходимый режим работы нагрузки задается исследователем и требуется быстро оценить форму кривой напряжения или тока, а в дальнейшем с помощью специального программного обеспечения возможно произвести анализ кривых во временной или частотной области [6].

На рисунке 2.6 показан процесс проведения экспериментальных исследований ПКЭ во внутрив заводской сети 10 кВ металлургического предприятия АО «Металлургический завод Балаково». Для оценки степени влияния ПЧ-АВ на ПКЭ и анализа текущих режимов работы внутрив заводской системы электроснабжения с помощью указанных измерительных комплексов были записаны мгновенные значения напряжений и токов на различных участках внутрив заводской сети. Точки подключения измерительных комплексов отмечены на рисунке 2.5. Сигналы с измерительных обмоток трансформаторов напряжения фидеров подавались на клеммы цепей измерения напряжения анализаторов качества электроэнергии. Запись мгновенных значений токов трансформаторов тока цепей защиты фидеров производилась с помощью токовых клещей. Из-за аппаратных ограничений применяемого оборудования расчёт высших гармонических составляющих записанных напряжений и токов проводился до 150 гармоники.

Введем в рассмотрение следующие режимы работы нагрузки и конфигурации сети 10 кВ:

– Режим 1. Стан в работе, питание РП-4 от Т2, межсекционный выключатель ЗРУ-10 кВ включен.

– Режим 2. Стан в работе, питание РП-4 от Т2, межсекционный выключатель ЗРУ-10 кВ включен, фильтрокомпенсирующее устройство (ФКУ) 5, 7 гармоник включены.

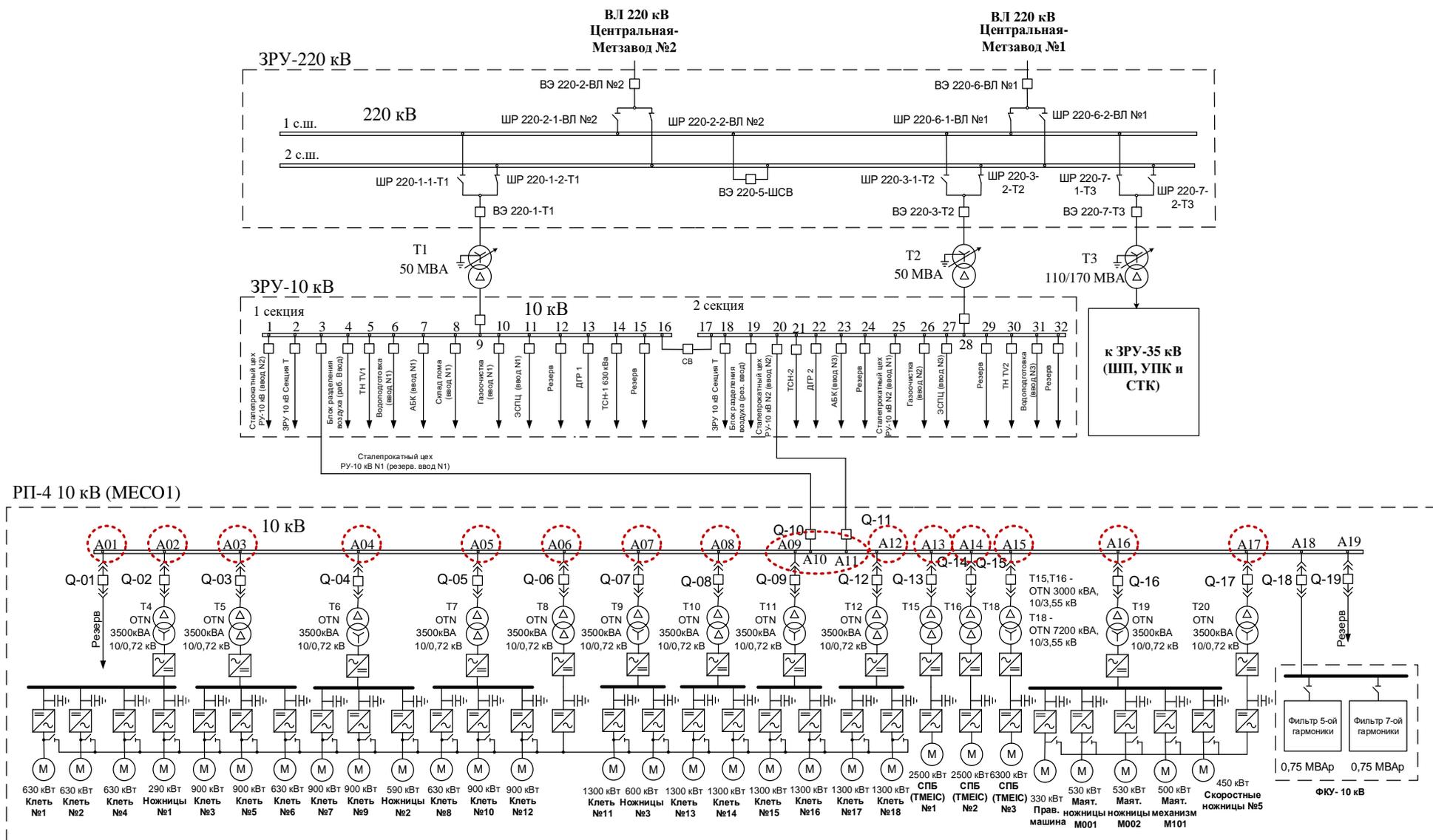


Рисунок 2.5 - Схема электроснабжения главных приводов сортового стана АО «Металлургический завод Балаково» с точками подключения измерительных комплексов (отмечены красными кругами)



Рисунок 2.6 – Измерительный комплекс на базе анализатора качества электроэнергии ELSPEC G4420 для исследования гармонического состава напряжений токов в распределительной сети 10 кВ АО «Металлургический завод Балаково» (Россия)

- Режим 3. ТМЕИС 1,2 на холостом ходу, все DRM на холостом ходу, питание РП-4 от Т2, межсекционный выключатель ЗРУ-10 кВ отключен.
- Режим 4. ТМЕИС 2 на холостом ходу, все DRM на холостом ходу, питание РП-4 от Т2, межсекционный выключатель ЗРУ-10 кВ отключен.
- Режим 5. ТМЕИС 1,2,3 отключены, все DRM на холостом ходу, питание РП-4 от Т2, межсекционный выключатель ЗРУ-10 кВ отключен.
- Режим 6. ТМЕИС 3 на холостом ходу, все DRM на холостом ходу, питание РП-4 от Т2, межсекционный выключатель ЗРУ-10 кВ отключен.
- Режим 7. ТМЕИС 1 на холостом ходу, все DRM на холостом ходу, питание РП-4 от Т2, межсекционный выключатель ЗРУ-10 кВ отключен.
- Режим 8. ТМЕИС 1 на холостом ходу, половина DRM отключена, питание РП-4 от Т2, межсекционный выключатель ЗРУ-10 кВ отключен.
- Режим 9. ТМЕИС 1 на холостом ходу, все DRM отключены, питание РП-4 от Т2, межсекционный выключатель ЗРУ-10 кВ отключен.

– Режим 10. ТМЕИС 1,2 на холостом ходу, все DRM отключены, питание РП-4 от Т2, межсекционный выключатель ЗРУ-10 кВ отключен.

– Режим 11. ТМЕИС 1,2 на холостом ходу, все DRM отключены, питание РП-4 от Т2, межсекционный выключатель ЗРУ-10 кВ включен, трансформатор Т1 отключен.

Стоит отметить, что первые два режима работы имеют место в нормальной схеме электроснабжения (когда не наблюдается резонанс), стан в работе, питание РП-4 производится от второй секции ЗРУ-10 кВ (фидер 20), межсекционный выключатель ЗРУ-10 кВ включен, трансформатор Т1 отключен, Т2 в работе. Отличие Режима 2 от Режима 1 состоит в том, что во втором режиме включены ФКУ 5, 7 гармоники на РП-4.

Остальные режимы с 3 по 11 создавались специально, для проведения активных экспериментов по исследованию резонансных явлений в сети 10 кВ при работе на холостом ходу мощных электроприводов скоростных проволочных блоков сортового стана.

Режимы с 3 по 10, с точки зрения конфигурации системы электроснабжения, проводились при одинаковых условиях: питание РП-4 производилось от второй секции ЗРУ-10 кВ (фидер 20), межсекционный выключатель ЗРУ-10 кВ отключен, Т2 в работе; остальная часть завода (кроме РП-4 МЕСО1) получали питание от первой секции ЗРУ-10 кВ, Т1 в работе. В рамках указанных режимов в различных сочетаниях вводились в работу на холостом ходу один (№1, №2 или №3) или два (№1 и №2) преобразователя частоты ТМЕИС. Не исследовался режим, когда все три преобразователя ТМЕИС были бы в работе, поскольку искажения кривой напряжения на шинах 10 кВ РП-4 от работы даже двух преобразователей уже превышают допустимые значения. Также оценивалось влияние на резонанс работы на холостом ходу выпрямителей фирмы Siemens: в режиме 8 половина DRM была отключена, в режимах 9,10 все DRM были отключены, в режимах с 3 по 7 все DRM на холостом ходу.

Последний 11 режим работ соответствовал нормальной схеме электроснабжения (как в 1 режиме), однако стан был не в работе, ТМЕИС 1,2 на холостом ходу, все DRM отключены.

На рисунках 2.7-2.10 представлены осциллограммы токов фидеров, список которых показан в таблице 2.4. Исследовался режим работы №1 (стан в работе, питание РП-4 от Т2, межсекционный выключатель ЗРУ-10 кВ включен).

Анализ осциллограмм позволяет сформулировать следующие выводы:

1. В сетевых токах преобразователей частоты ТМЕИС №1, 2 основными высшими гармониками являются 5 и 7, у них приблизительно одинаковые амплитуды порядка 11 А, а коэффициент искажения по току K_I составляет 22-23%.

2. В сетевых токах преобразователей фирмы Siemens, а это все остальные потребители на РП-4 МЕСО1, преобладающей высшей гармоникой является 5, ее амплитуда в зависимости от номера фидера изменяется в диапазоне от 30 А до 45 А. Заметим, что следующая за ней 7 гармоника имеет значительно меньшую амплитуду 10-12 А. Коэффициент искажения по току K_I для этих преобразователей составляет 31-45%.

3. Сравнивая сетевые токи преобразователей ТМЕИС и Siemens, отмечаем, что применение широтно-импульсной модуляции в преобразователях ТМЕИС снижает амплитуду значимых гармоник в 3-4 раза, а показатель искажения по току K_I улучшается в 1,5-2 раза.

4. Установлено, что форма сетевого тока у преобразователей фирмы Siemens различается: к первому виду следует отнести фидеры 2, 4, 7, 9, ко второму – 3, 5, 8, 12. Несмотря на это гармонические составы токов выделенных двух групп одинаковые. Показанной закономерности имеется простое объяснение: фирмой производителем на этапе проектирования были заложены разные группы соединения преобразовательных трансформаторов: для фидеров 2, 4, 7, 9 – «треугольник» / «звезда», для фидеров 3, 5, 8, 12 – «треугольник» / «треугольник». Подобное техническое решение позволяет частично

скомпенсировать гармоники тока из ряда 5, 7, 17, 19 и т.д. и тем самым, снизить потери от высших гармоник в трансформаторе ГПП.

5. Преобразователи фирмы Siemens со стороны сети выполнены на основе модулей по технологии Smart. Данная технология позволяет в режимах торможения электропривода отдавать накопленную кинетическую энергию в сеть, а не рассеивать ее на тормозном резисторе. Осциллограмма на рисунке 2.10 наглядно подтверждает это: при совершении реза маятниковыми ножницами привод кратковременно заходит в генераторный режим. Следует отметить, что при работе в двигательном режиме форма кривой тока имеет достаточно плавный вид, а при переходе в генераторный режим в кривой тока наблюдаются резкие, скачкообразные изменения – это особенность данной технологии [7].

Таблица 2.4 – Список фидеров

Обозначение	Нагрузка
Рисунок 2.7	A13 (ТМЕІС 1)
Рисунок 2.8	A02 (клетки 1,2,4)
Рисунок 2.9	A03 (клетки 3,5,6)
Рисунок 2.10	A16 (правильная машина, маятниковые ножницы 1, 2)

Диаграммы на рисунках 2.11 – 2.15 иллюстрируют работу в режиме 2, с помощью которого исследовалось поведение ФКУ 5 и 7 гармоники на РП-4 МЕСО1. Кривые тока ФКУ и их гармонический состав показаны для трех характерных моментов времени на рисунках 2.11-2.13. Как следует из диаграмм форма кривой тока близка к синусоидальной, K_I составляет 14-19%.

На диаграммах 2.11, 2.12 показаны осциллограммы и спектры линейного напряжения на шинах 10 кВ РП-4 и тока ввода №2 (фидер A11) для режима 2 с работающим ФКУ. Как следует из рисунков, в напряжении отсутствуют 5 и 7 гармоники, а значимыми являются 11 и 13, их амплитуды составляют 2% и 1%. Форма кривой напряжения практически синусоидальная K_U составляет 3,16%. По току этот показатель равен 6,47%, однако это очень низкий уровень, с учетом того, что вся нагрузка РП-4 нелинейная и несинусоидальная.

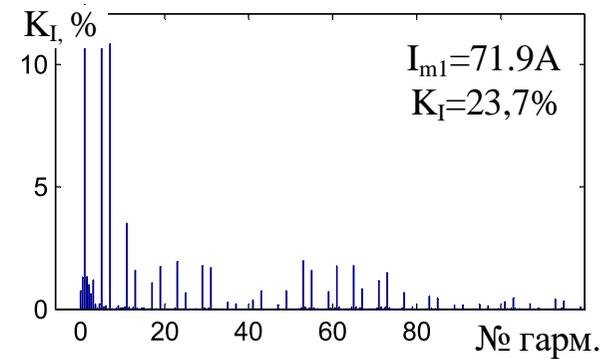
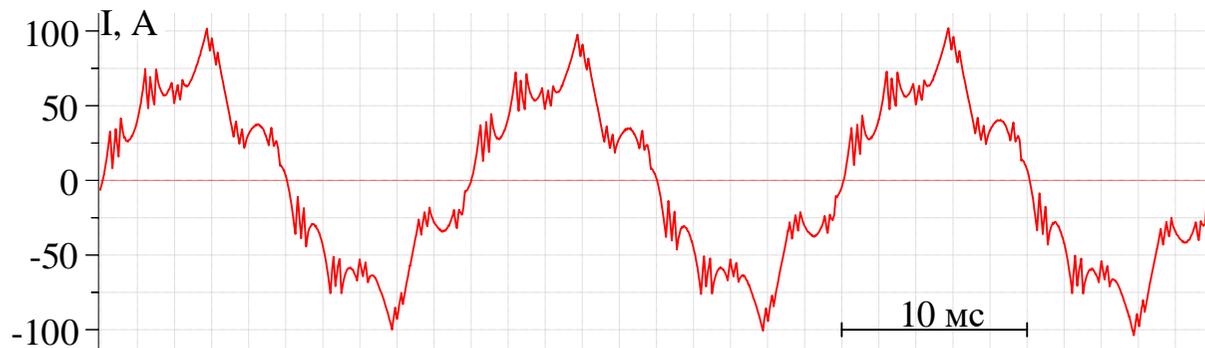


Рисунок 2.7 - Осциллограмма тока фидера А13 (ТМЕИС 1) для режима № 1: стан в работе, питание РП-4 от Т2, межсекционный выключатель ЗРУ-10 кВ включен

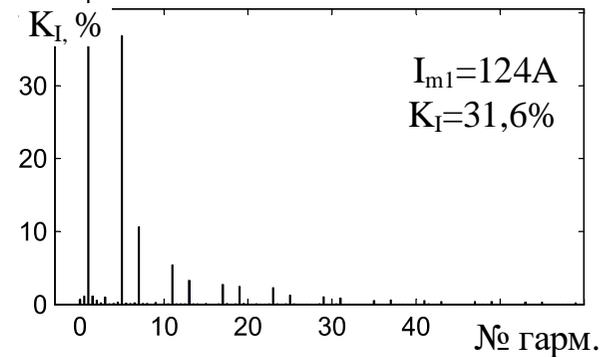
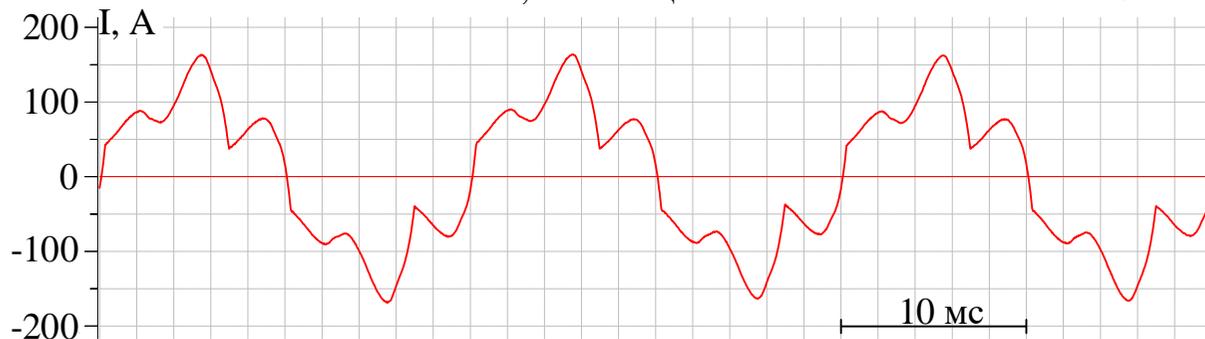


Рисунок 2.8 - Осциллограмма тока фидера А02 (клетки 1,2,4) для режима № 1: стан в работе, питание РП-4 от Т2, межсекционный выключатель ЗРУ-10 кВ включен

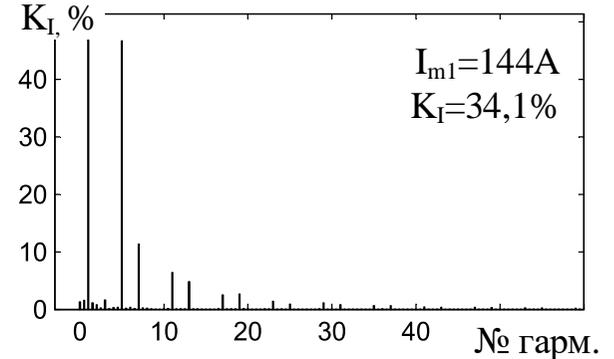
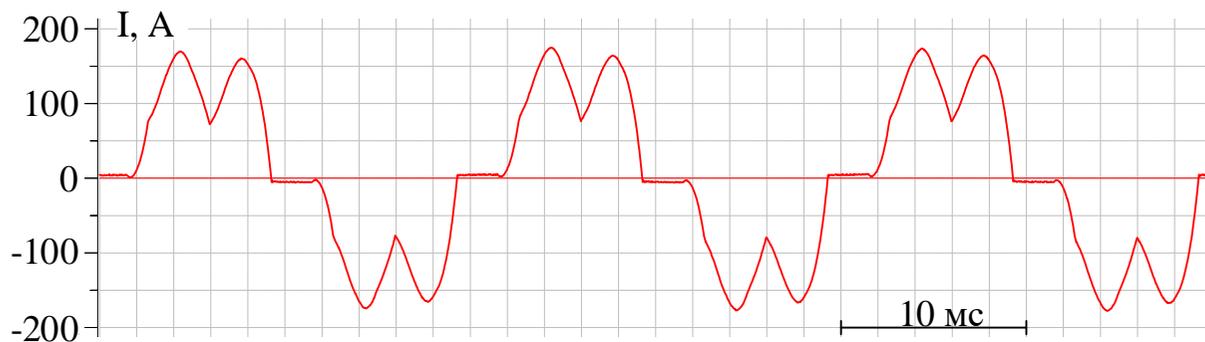


Рисунок 2.9 - Осциллограмма тока фидера А03 (клетки 3,5,6) для режима № 1: стан в работе, питание РП-4 от Т2, межсекционный выключатель ЗРУ-10 кВ включен

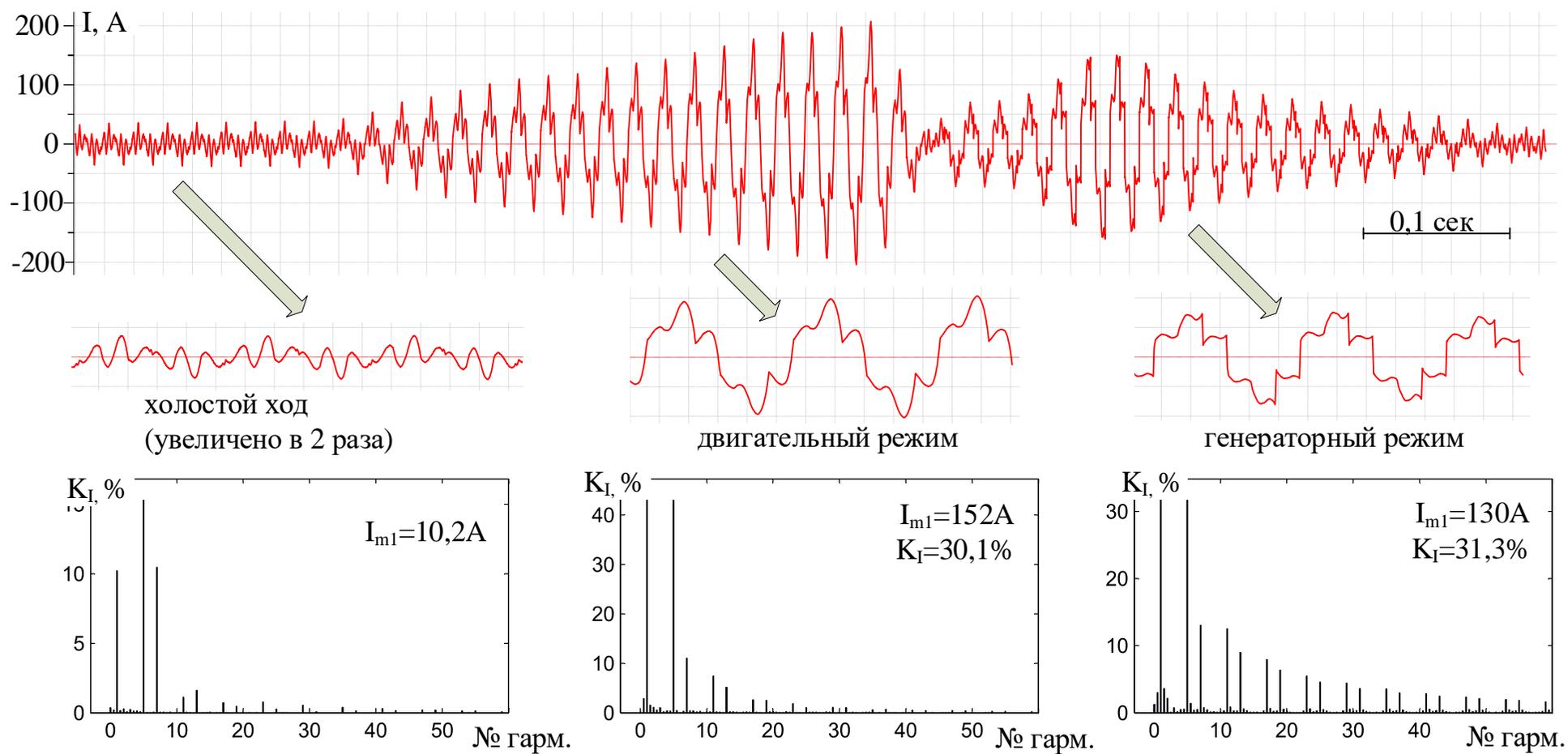


Рисунок 2.10 - Осциллограмма тока фидера А16 (правильная машина, маятниковые ножницы 1, 2) для режима № 1: стан в работе, питание РП-4 от Т2, межсекционный выключатель ЗРУ-10 кВ включен

Особого внимания заслуживает гармонический состав тока ввода №2, как следует из рисунка 2.12, в нем присутствуют 5 и 7 гармоники, причем их уровень приблизительно равен уровню 11 и 13 гармоник и составляет 20-30 А. Теоретически, при включенных фильтрах 5 и 7 гармоник, ток ввода не должен содержать этих гармоник, поскольку они должны замыкаться через фильтры, а не через питающую сеть. Сравнивая количественно содержание этих гармоник в токах ФКУ (10-15 А) и токе ввода (20-30 А), можно констатировать, что в системе электроснабжения на уровне 10 кВ на момент проведения осциллографирования присутствовали элементы, которые обладали меньшим сопротивлением на частотах 5 и 7 гармоник, чем специально настроенные на них ФКУ.

Осциллограммы на рисунке 2.13 – 2.21 имеют место для режимов 3-11 в которых наблюдались резонансные явления на шинах 10 кВ РП-4 МЕСО1. На рисунке 2.13 представлены осциллограммы и спектры напряжения и тока преобразователя ТМЕИС 1 для режима 3. Кривая напряжения сильно искажена, K_U составляет 10,1%. Значимые гармоники 53, 55, 59, 61, 65, 67, 71, 73 имеют амплитуды 3,7-5,2% (для первых пяти из перечисленного ряда гармоник) и 1,3-1,7% (для оставшихся трех). В кривой сетевого преобразователя ТМЕИС 1 помимо низкочастотных гармоник 5, 7, 11, 13 также присутствуют гармоники в диапазоне 53 -73, причем их амплитуды достигают уровней 1,5-2,7 А.

Осциллограммы на рисунке 2.14 имеют место для режима 4, который отличается от режима 3 тем, что вместо двух преобразователей ТМЕИС на холостом ходу теперь остался только один – ТМЕИС 2.

Как следствие, искажения кривой напряжения на шинах 10 кВ снизились практически в 2 раза с 10,1% (для режима 3) до 5,4% для режима 4. Значимые гармоники остались в том же частотном диапазоне, амплитуды первых пяти гармоник из выше перечисленного ряда составляют 2-2,7%.

На рисунке 2.15 представлена осциллограмма напряжения на шинах 10 кВ для режима 5, когда все три преобразователя ТМЕИС отключены.

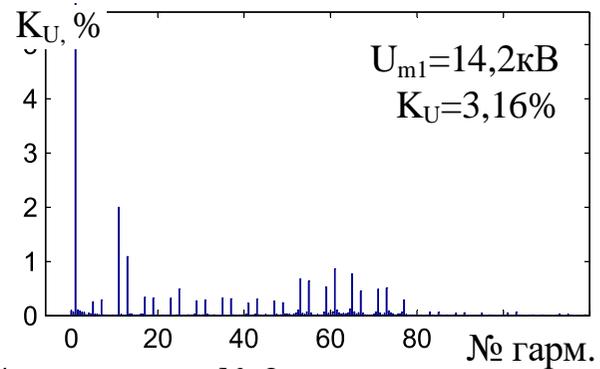


Рисунок 2.11 - Осциллограмма линейного напряжения на шинах 10 кВ РП-4 для режима № 2: стан в работе, питание РП-4 от Т2, межсекционный выключатель ЗРУ-10 кВ включен, ФКУ включены

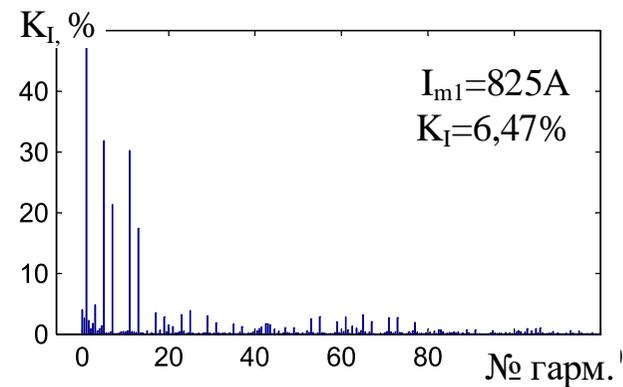
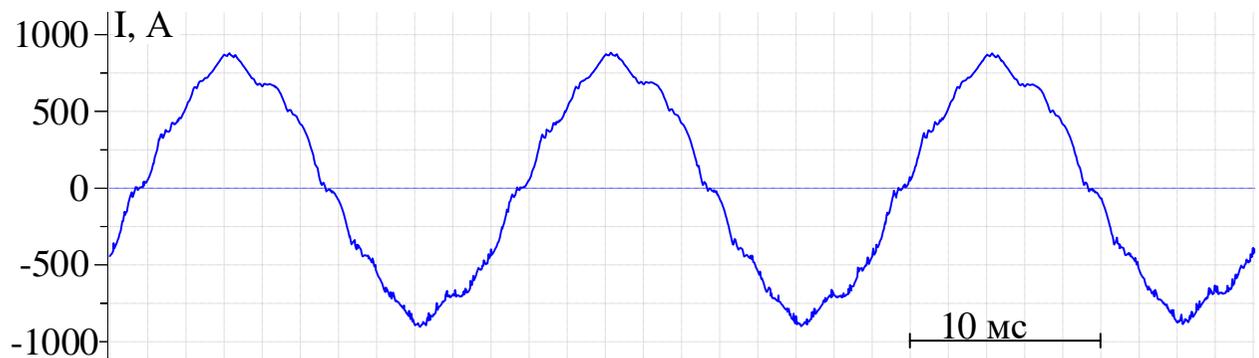


Рисунок 2.12 - Осциллограмма тока фидера А11 (ввод №2) для режима № 2: стан в работе, питание РП-4 от Т2, межсекционный выключатель ЗРУ-10 кВ включен, ФКУ включены

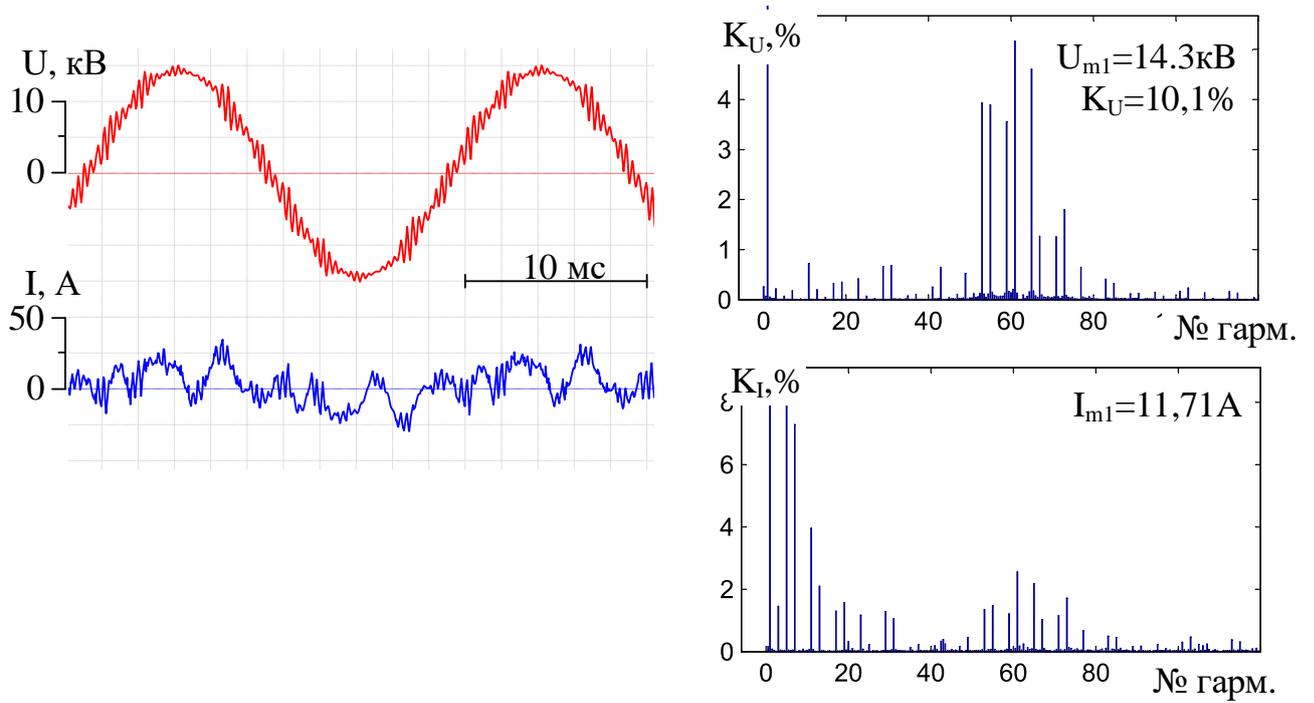


Рисунок 2.13 - Осциллограммы линейного напряжения на шинах 10 кВ РП-4 и тока фидера А13 (ТМЕИС 1) для режима № 3: ТМЕИС 1,2 на холостом ходу, все DRM на холостом ходу

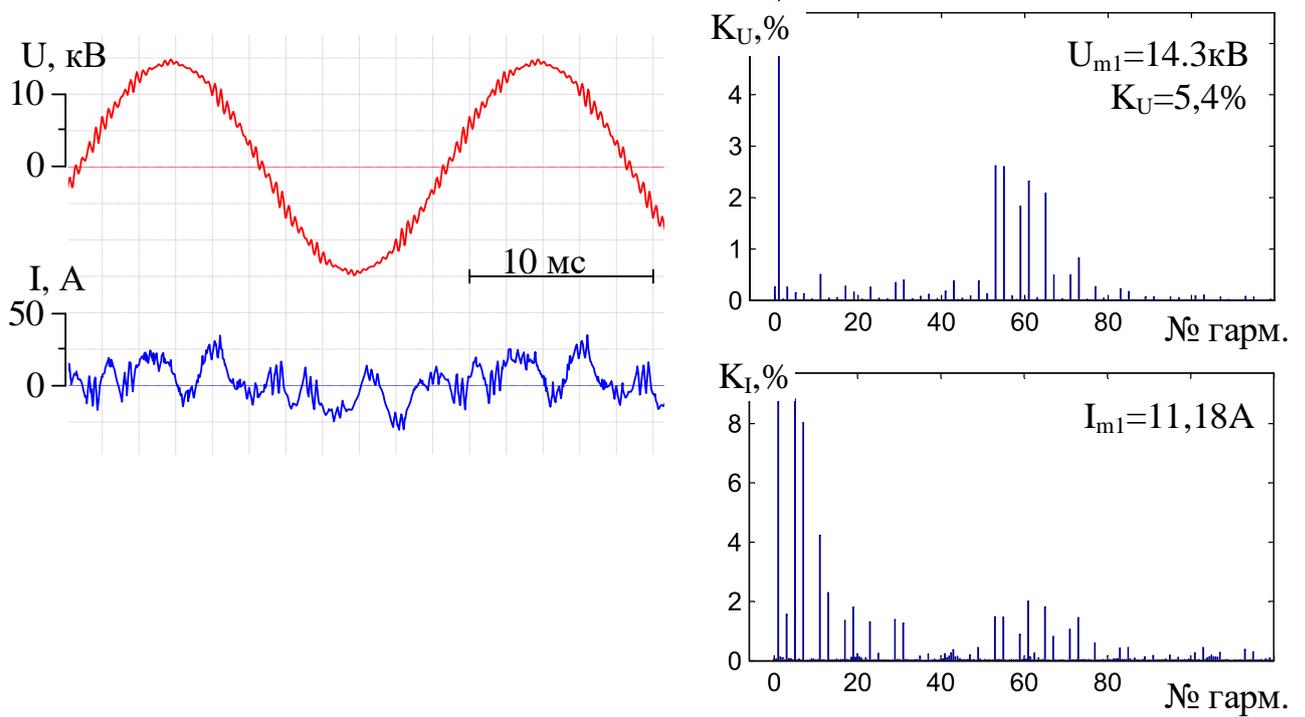


Рисунок 2.14 - Осциллограммы линейного напряжения на шинах 10 кВ РП-4 и тока фидера А14 (ТМЕИС 2) для режима № 4: ТМЕИС 2 на холостом ходу, все DRM на холостом ходу

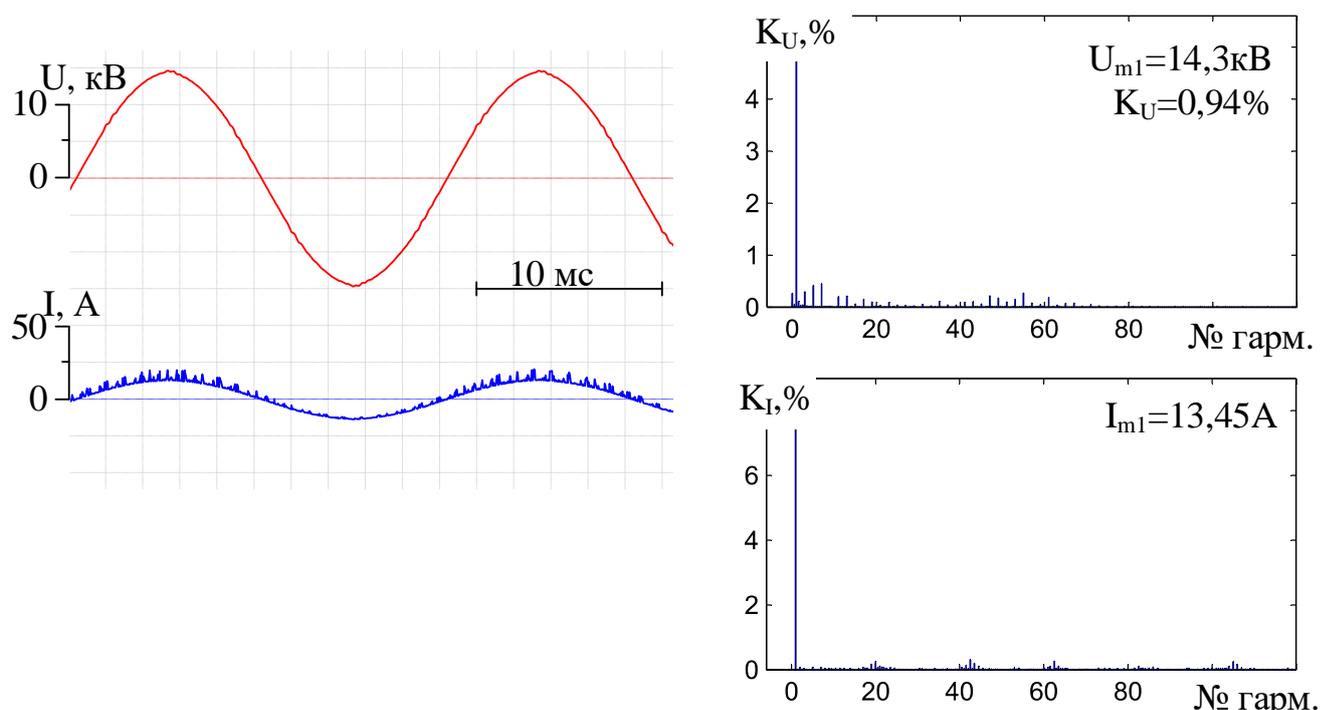


Рисунок 2.15 - Осциллограммы линейного напряжения на шинах 10 кВ РП-4 и тока фидера. А14 (ТМЕИС 2) для режима № 5: ТМЕИС 1,2,3 отключены, все DRM на холостом ходу

Кривая напряжения в этом случае – чистая синусоида $K_U = 0,94\%$, из чего можно сделать вывод, что именно преобразователи ТМЕИС искажают форму кривой напряжения на шинах 10 кВ РП-4.

На рисунке 2.16 представлены осциллограммы для режима 6, в котором из трех преобразователе ТМЕИС включен один, самый мощный ТМЕИС 3. Искажение кривой напряжения $K_U = 10,8\%$ практически такое же, как для режима 3 ($K_U = 10,1\%$), когда на холостом ходу были преобразователи ТМЕИС 1,2.

В предшествующих четырех режимах (с 3 по 6) анализировалось влияние работы преобразователей ТМЕИС на форму кривой напряжения, в следующих трех режимах (с 7 по 9) исследовалось, оказывают ли подобное влияние преобразователи фирмы Siemens.

В режиме 7 (рисунок 2.17) все DRM были на холостом ходу, в режиме 8 (рисунок 2.18) половина DRM была отключена, наконец, в режиме 9 (рисунок 2.19) все DRM были отключены. Для перечисленных трех режимов на холостом ходу работал преобразователь ТМЕИС 1.

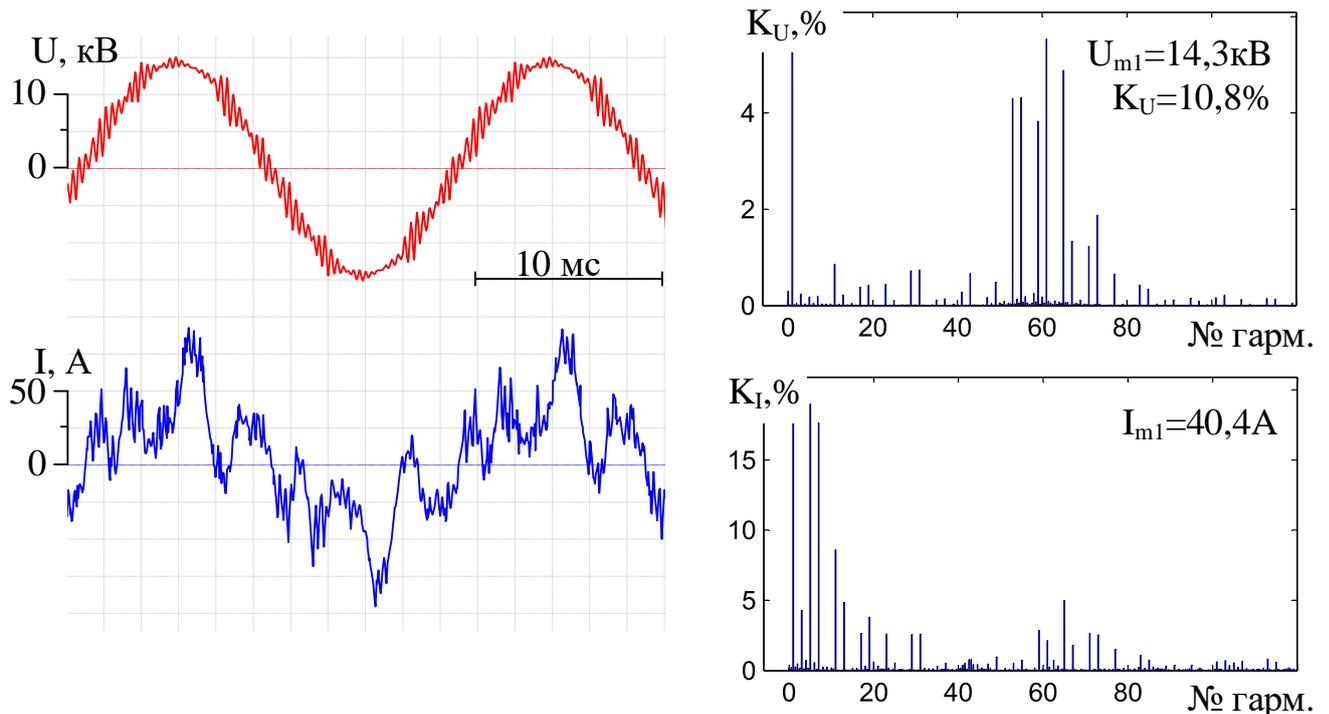


Рисунок 2.16 - Осциллограммы линейного напряжения на шинах 10 кВ РП-4 и тока фидера А15 (ТМЕИС 3) для режима № 6: ТМЕИС 3 на холостом ходу, все DRM на холостом ходу

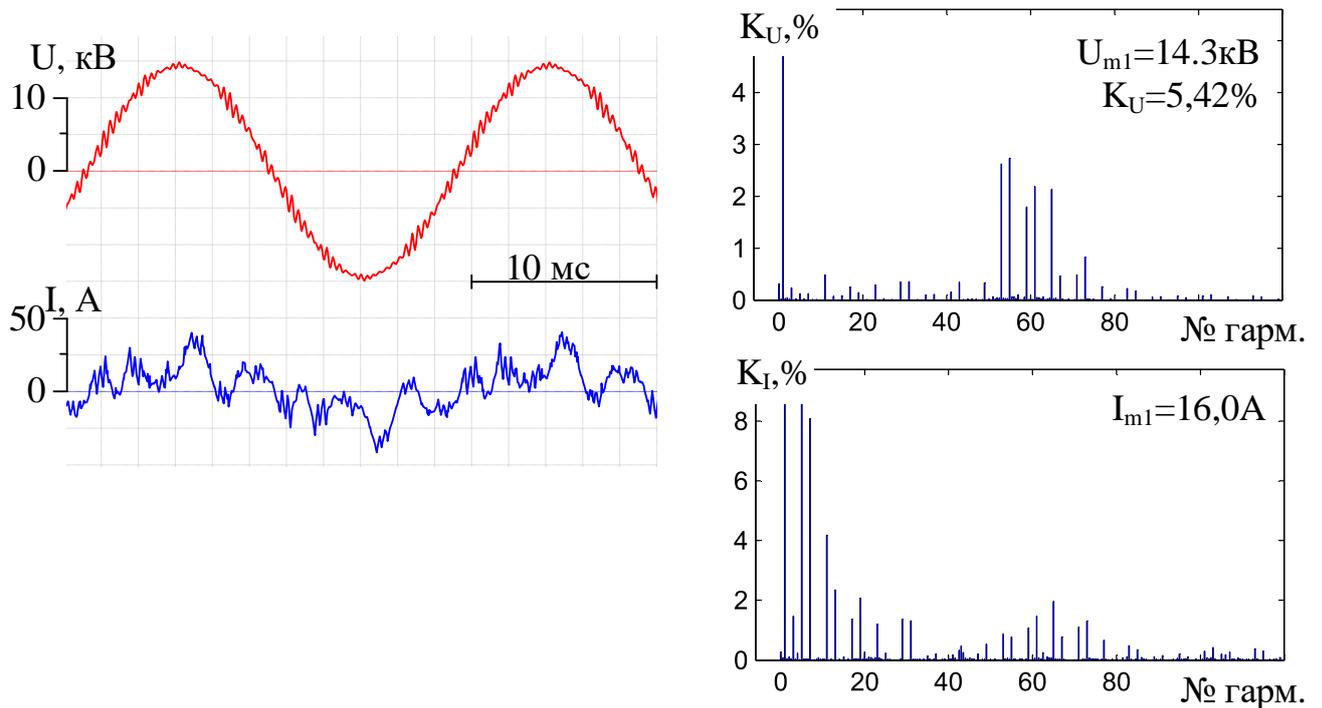


Рисунок 2.17 - Осциллограммы линейного напряжения на шинах 10 кВ РП-4 и тока фидера А13 (ТМЕИС 1) для режима № 7: ТМЕИС 1 на холостом ходу, все DRM на холостом ходу

Как следует из спектрограмм на рисунках 2.17-2.19 искажение формы кривой напряжения на шинах 10 кВ практически не зависит от работы DRM, коэффициент нелинейных искажения по напряжению составил 5,42% для режима 7 - 5,62% для режима 8 и 5,39% для режима 9.

Осциллограммы на рисунке 2.20 и рисунке 2.21 имеют место для режимов 10 и 11 и наглядно показывают, что включение межсекционного выключателя ЗРУ-10 кВ и, тем самым, объединение секций приводит к исчезновению резонанса: K_U по напряжению уменьшился с 11,1% (режим 10) до 0,92% (режим 11).

Осциллограммы, описание которых было приведено ранее (рисунки 2.7 – 2.21), были записаны с помощью портативного регистратора FLASH-Recorder. Ниже на рисунках 2.22-2.28 представлены диаграммы, записанные регистратором показателей качества электрической энергии Elspec G4420.

Данный прибор был стационарно установлен на вводе №2 (фидер А11) РП-4 МЕСО1. Запись проводилась в течение двух суток: с 14:30 24.02.2016 по 17:30 26.02.2016.

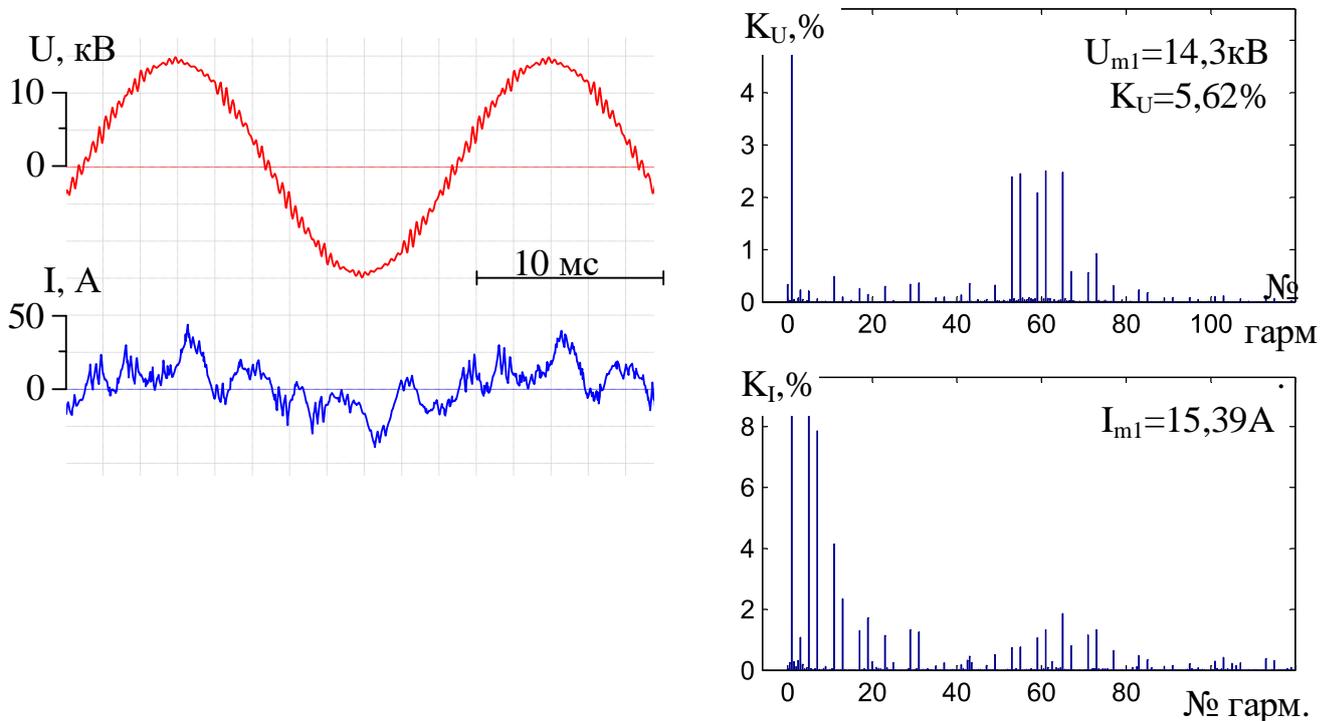


Рисунок 2.18 - Осциллограммы линейного напряжения на шинах 10 кВ РП-4 и тока фидера А13 (ТМЕИС 1) для режима № 8: ТМЕИС 1 на холостом ходу, половина DRM на холостом ходу, половина DRM отключена

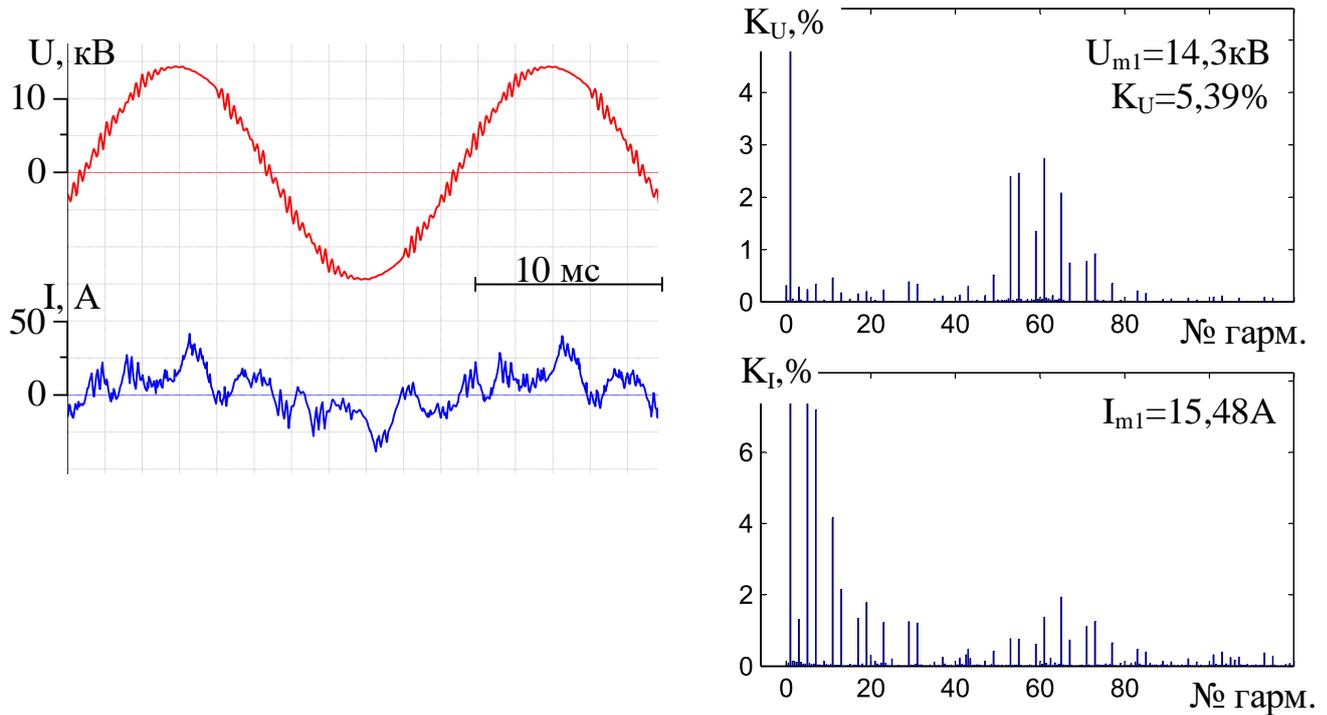


Рисунок 2.19 - Осциллограммы линейного напряжения на шинах 10 кВ РП-4 и тока фидера А13 (ТМЕИС 1) для режима № 9: ТМЕИС 1 на холостом ходу, все DRM отключены

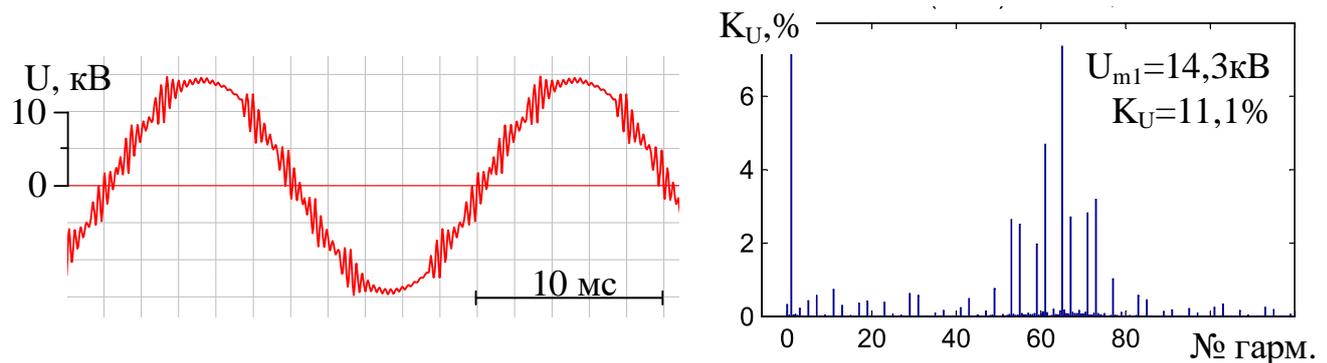


Рисунок 2.20 - Осциллограмма линейного напряжения на шинах 10 кВ РП-4 для режима № 10: ТМЕИС 1,2 на холостом ходу, все DRM отключены, питание РП-4 от Т2, межсекционный выключатель ЗРУ-10 кВ отключен

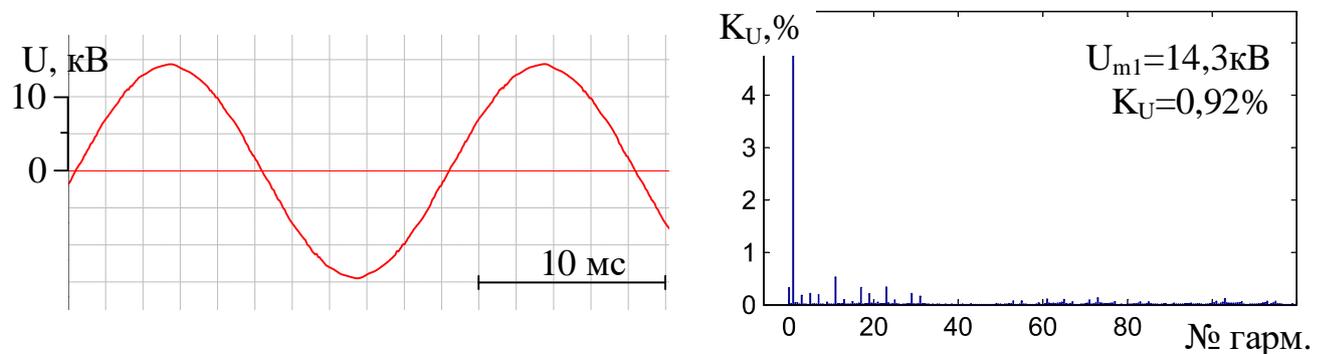


Рисунок 2.21 - Осциллограмма линейного напряжения на шинах 10 кВ РП-4 для режима № 11: ТМЕИС 1,2 на холостом ходу, все DRM отключены, питание РП-4 от Т2, межсекционный выключатель ЗРУ-10 кВ включен, трансформатор Т1 отключен

Анализ представленных диаграмм позволил установить следующее:

– прямая последовательность напряжения в течение наблюдаемого интервала времени (2 суток) сохраняла среднюю величину на уровне 10 кВ (линейного напряжения), отклонения не превышали $\pm 2\%$ (максимальные значения);

– несимметрия напряжения составляет 0,4-0,6% - очень хороший показатель, и увеличивалась до 1,2% при проведении активных экспериментов с преобразователями ТМЕИС по исследованию резонансных явлений;

– коэффициент нелинейных искажений кривой напряжения K_U в основном составляет 1-4% (допустимая величина 5%), при проведении активных экспериментов с преобразователями ТМЕИС по исследованию резонансных явлений увеличивался до 10-11%, кроме того дважды за наблюдаемый период времени отмечены всплески K_U до уровня 7%.

На рисунках 2.22-2.24 показаны кривые мгновенных значений для режимов 6, 3, 9, а на рисунках 2.25-2.27 гармонические составы линейного напряжения на шинах 10 кВ РП-4. Сравнивая спектр на рисунке 2.25 (режим 6, регистратор Elspec G4420) со спектром на рисунке 2.16 (режим 6, регистратор FLASH-Recorder), можно сделать вывод, что результаты, выдаваемые двумя регистраторами, полностью совпадают.

Необходимо отметить, что в ходе эксплуатации сортопрокатного стана был зафиксирован режим, напрямую показывающий взаимосвязь между качеством напряжения в сети 10 кВ и надежностью работы электроприводов.

При анализе корреляции между искаженным напряжением в сети 10 кВ и выходом из строя ПЧ Siemens S120 нужно учитывать следующее:

1. Для увеличения мощности на входе преобразователя Siemens S120 применена схема с параллельным включением нескольких модулей: 2-х модулей в DRM09, 3-х модулей в DRM01-DRM08 (ЭТП-1). Каждый модуль состоит из сетевого дросселя и последовательно соединенного с ним выпрямительного диодно-транзисторного блока типа Smart. По входу все дроссели соединены параллельно и получают питание от вторичной обмотки преобразовательного трансформатора 10/0,72 кВ. По

выходу блоки типа Smart также соединены параллельно и образуют общие шины постоянного тока, от которых получают питание инверторы [27].

2. В выпрямителях типа Smart путь протекания тока зависит от режима работы электропривода. В двигательном режиме работы ток протекает только по диодам, транзисторы закрыты, поскольку напряжение в звене постоянного тока меньше мгновенных значений напряжения в сети. В тормозных режимах напряжение звена постоянного тока вырастает и оказывается больше напряжения сети, как следствие, диоды мостовой схемы закрываются, а ток протекает через транзисторы. На холостом ходу ток протекает попеременно – часть периода времени через диоды, часть – через транзисторы, в зависимости от соотношения между указанными напряжениями. Специальная схема в системе управления преобразователем формирует управляющие сигналы для транзисторов. Указанные сигналы имеют форму широких импульсов, длительностью чуть меньше 120 эл. градусов. Фаза этих импульсов синхронизируется с вектором напряжения сети, это производится специальным модулем – цифровым датчиком напряжения VSM-10 (Voltage Sensor Module). В составе модуля на программном уровне предусмотрена цифровая фильтрация мгновенных значений напряжения сети, что при правильной настройке фильтра позволяет повысить помехоустойчивость преобразователя к высшим гармоникам питающего напряжения [28].

3. В режимах, когда питающее напряжение сильно искажено, а путь протекания тока лежит через транзисторы силовой схемы, могут иметь место следующие ситуации: 1) при неправильном формировании управляющих импульсов, токи параллельно работающих модулей Smart делятся неравномерно и в результате, один из модулей перегружается по току; 2) при кратковременном сбое импульсов, возникает режим короткого замыкания по постоянному току через два транзистора одной фазы.

Любая из вышеперечисленных ситуаций может служить причиной выхода из строя преобразователя Siemens S120.

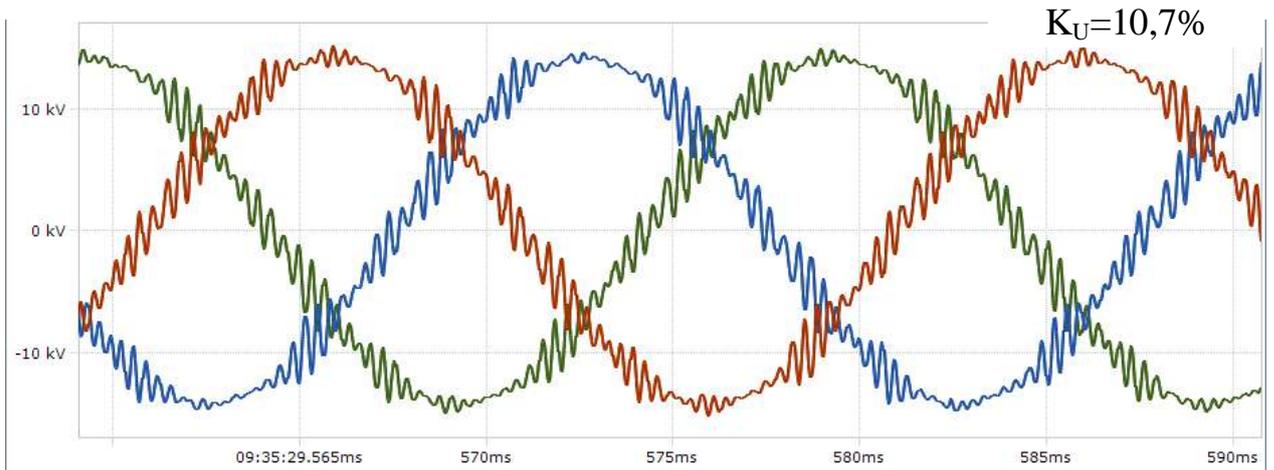


Рисунок 2.22 - Осциллограммы линейных напряжения на шинах 10 кВ РП-4 для режима №6: ТМЕИС 3 на холостом ходу, все DRM на холостом ходу. Регистратор – Elspec G4420.

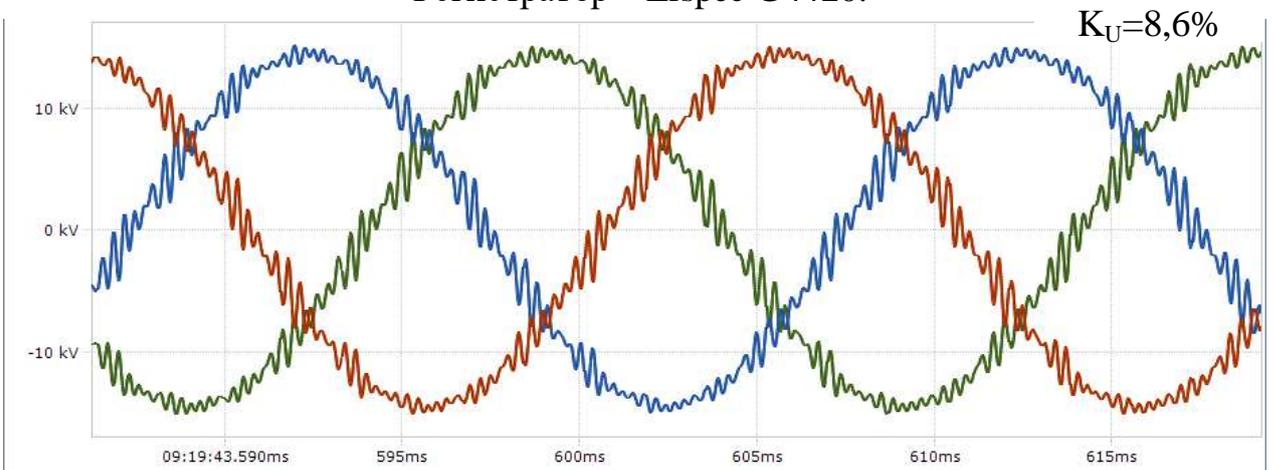


Рисунок 2.23 - Осциллограммы линейных напряжения на шинах 10 кВ РП-4 для режима №3: ТМЕИС 1,2 на холостом ходу, все DRM на холостом ходу. Регистратор – Elspec G4420.

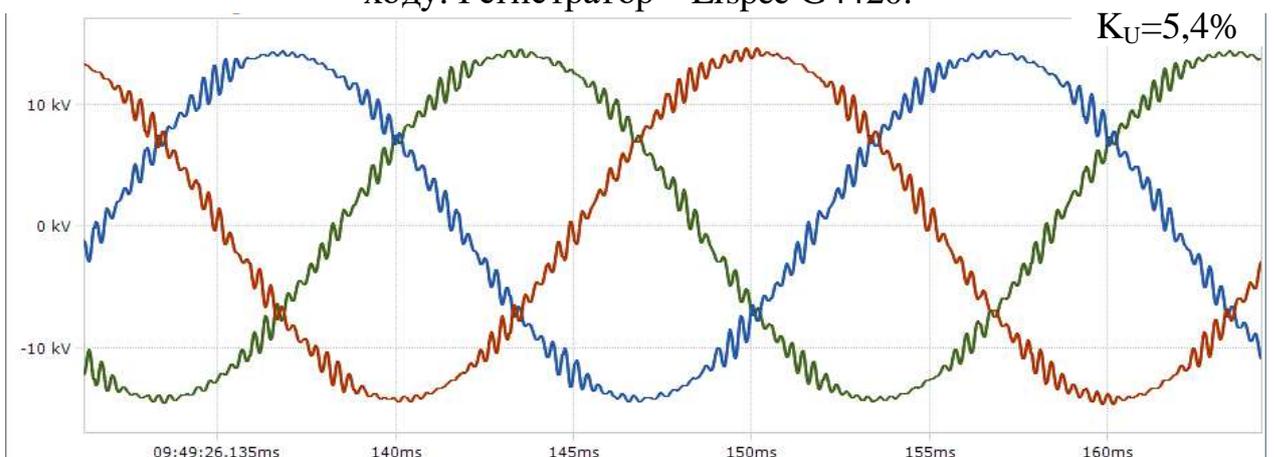


Рисунок 2.24 - Осциллограммы линейных напряжения на шинах 10 кВ РП-4 для режима №9: ТМЕИС 1 на холостом ходу, все DRM отключены. Регистратор – Elspec G4420.

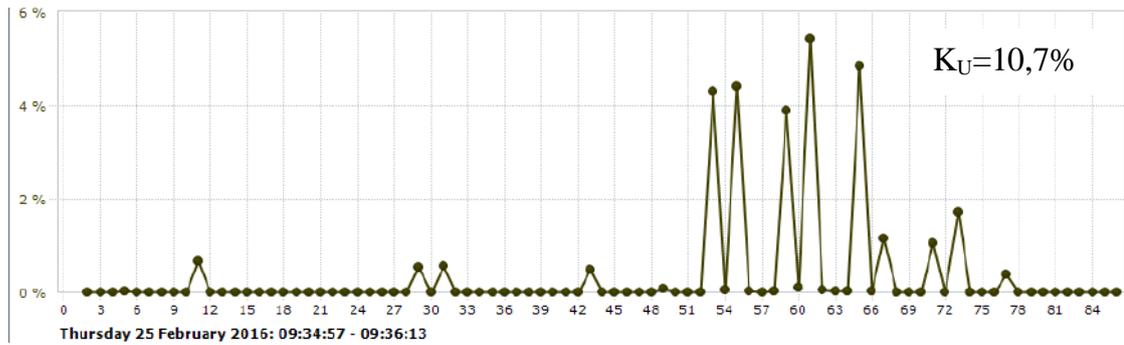


Рисунок 2.25 - Гармонический состав линейного напряжения на шинах 10 кВ РП-4 для режима № 6: ТМЕИС 3 на холостом ходу, все DRM на холостом ходу. Регистратор – Elspec G4420.

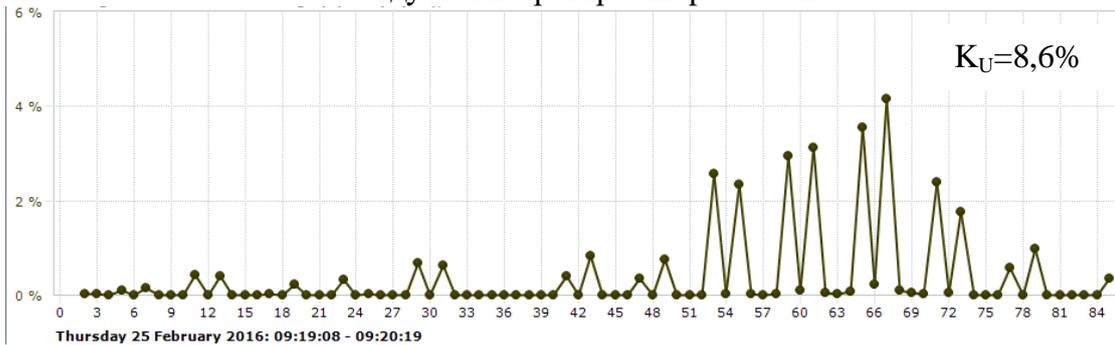


Рисунок 2.26 - Гармонический состав линейного напряжения на шинах 10 кВ РП-4 для режима №3: ТМЕИС 1,2 на холостом ходу, все DRM на холостом ходу. Регистратор – Elspec G4420.

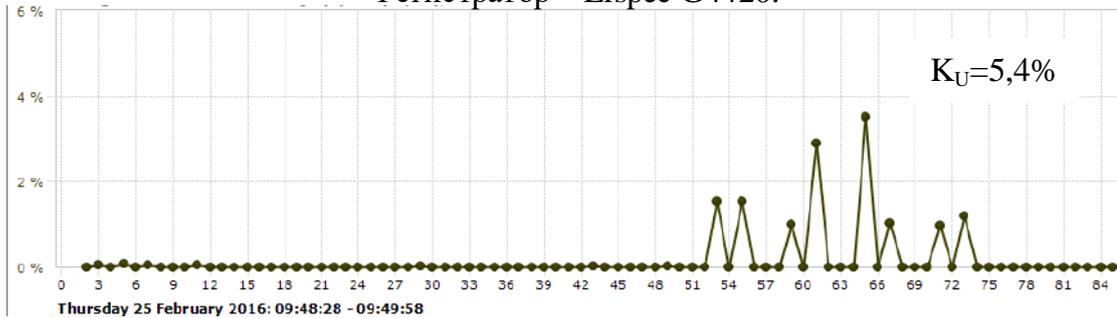


Рисунок 2.27 - Гармонический состав линейного напряжения на шинах 10 кВ РП-4 для режима №9: ТМЕИС 1 на холостом ходу, все DRM отключены. Регистратор – Elspec G4420.

2.4. Экспериментальное определение частотной характеристики сети 10 кВ

Исследование резонансных явлений, имеющих место на шинах 10 кВ РП-4, требует знать так называемую частотную характеристику сети. Это зависимость полного комплексного сопротивления (импеданса) сети от частоты (номера гармоники). Указанную зависимость, возможно, получить двумя способами: расчетным путем, опираясь на параметры сетевого трансформатора, кабельных линий и т.д.; экспериментальным путем, в этом случае среди потребителей,

подключенных к сети, должен присутствовать активный элемент, который генерирует в сеть высшие гармоники напряжения, под действием которых с учетом импеданса сети будут протекать токи высших гармоник, их соотношение позволит экспериментально определить частотную характеристику сети. В нашем случае таким элементом является активный выпрямитель в составе преобразователя частоты ТМЕИС, как видно из рисунка спектр гармоник напряжения, которые он генерирует в сеть, охватывает диапазон от 5 до 115, что вполне достаточно для решения поставленной задачи. Ниже представлена методика, по которой экспериментальным путем была снята частотная характеристика сети [1, 5, 15, 32, 40].

1. В спектре линейного напряжения на шинах 10 кВ (рисунок 2.28) выделяются гармоники с достаточным уровнем амплитуд, номера которых сведены в таблице 2.5.

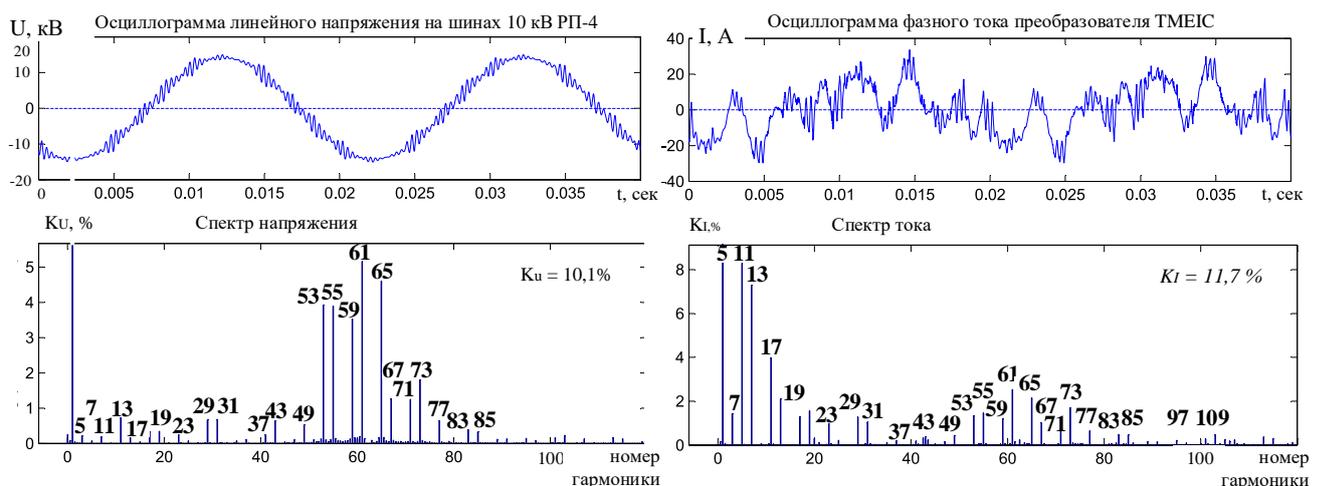


Рисунок 2.28 - Осциллограммы линейного напряжения на шинах 10 кВ РП-4 и фазного тока преобразователя ТМЕИС1 для режима № 6

Таблица 2.5 – Номера гармоник

Область	Номера гармоник									
Низкочастотная	3	7	11	13	17	19	23	29	31	37
Среднечастотная	43	47	49	53	55	59	61	65	67	71
Высокочастотная	73	77	83	85	91	95	101	103	113	115

2. В осциллограммах линейного напряжения и тока выбирается участок длительностью порядка 1,5 с (75 периодов питающего напряжения). Для

указанного участка методом скользящего среднего для заданных номеров рассчитываются значения амплитуд напряжения и тока высших гармоник.

3. Рассчитываются значения импеданса сети для заданных номеров высших гармоник, как отношение напряжения к току, расчет выполняется для всех периодов рассматриваемого участка времени.

4. Полученные значения усредняются и сводятся в таблицу 2.6, диаграмма зависимости полного сопротивления (импеданса) от частоты (номера гармоники) представлена на рисунке 2.29 [5].

На диаграмме (рисунок 2.29) точками показаны экспериментальные данные, а сплошными линиями – их аппроксимация. Полученная частотная характеристика имеет следующие характерные особенности:

– в низкочастотной и высокочастотной областях ее форма плавная, близка к линейной зависимости;

– в среднечастотной области в диапазоне частот, соответствующих номерам гармоник 53-65 наблюдается резкое увеличение сопротивления с максимумом в области 57 гармоники, коэффициент максимума составляет $254 \text{ Ом} / 77 \text{ Ом} = 3,3$.

Теоретическое объяснение зафиксированному экспериментально максимуму в кривой частотной характеристики представлено ниже.

Классически в схемах замещения питающая сеть на шинах 10 кВ представляется индуктивным сопротивлением, в основном обусловленным индуктивностью рассеивания трансформатора ГПП. Активное сопротивление трансформатора ввиду его высокой добротности (более 25) можно не учитывать.

Таблица 2.6 - Зависимость полного сопротивления (импеданса) от частоты (номера гармоники)

Номер гармоники	3	7	11	13	17	19	23	29	31	37
Импеданс, Ом	13,41	2,2	15,57	7,96	21,2	18,5	32,15	45,41	56	47,12
Номер гармоники	43	47	49	53	55	59	61	65	67	71
Импеданс, Ом	53,65	62,24	98,42	245,2	230,7	254,1	173,8	181,6	109,7	92,97
Номер гармоники	73	77	83	85	91	95	101	103	113	115
Импеданс, Ом	91,4	85,76	73,96	63,58	60,74	56,03	48,52	44,41	35,41	35,26

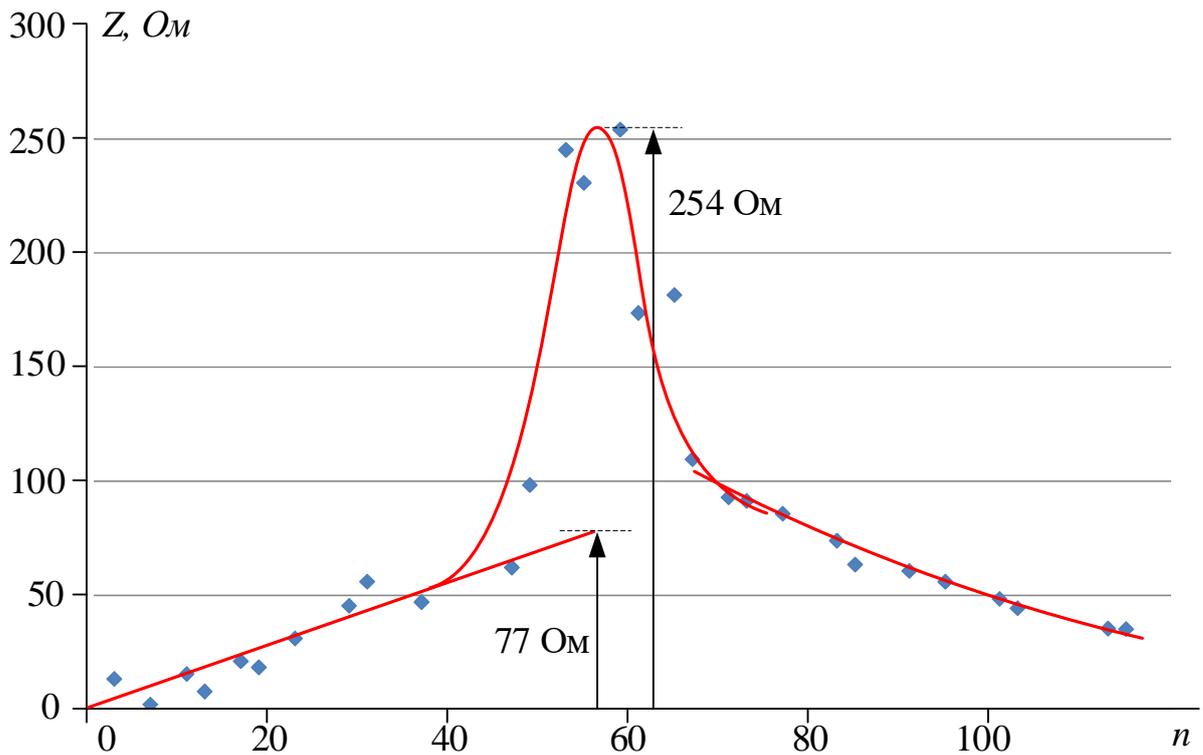


Рисунок 2.29 - Частотная характеристика сети – зависимость полного сопротивления (импеданса) от частоты (номера гармоники), точками показаны экспериментальные данные, сплошными линиями – их аппроксимация

В этом случае частотная характеристика представляет собой линейную зависимость импеданса от частоты (номера гармоники). Именно такую форму можно наблюдать в низкочастотной части кривой на рисунке 2.29. Появление максимума и, как следствие, снижение импеданса с ростом частоты объясняется учетом дополнительных элементов в схеме замещения питающей сети, в частности, распределённой емкости кабельных линий, отходящих от закрытых распределительных устройств ЗРУ 10 кВ к РП-1 – РП-5. Ввиду их значительной протяженности 400-900 метров эквивалентная емкость оказывается существенной и ее следует принимать во внимание. Шунтирование индуктивности рассеивания трансформатора ГПП емкостью кабельных линий приводит к значительному росту результирующего сопротивления сети (резонансу токов) в определенном диапазоне частот, а на высоких частотах импеданс наоборот снижается – емкостное сопротивление уменьшается при увеличении частоты, что и подтверждает кривая на рисунке 2.29 [5].

2.5 Выводы по главе

1. В системе электроснабжения АО «Металлургический завод Балаково» на уровне напряжения 10 кВ имеются 3 электроприемника мощностью 2х2,5 МВт и 6,3 МВт – преобразователи частоты фирмы TMEIC в составе электроприводов скоростных проволочных блоков. Указанные преобразователи частоты выполнены на основе активных выпрямителей, в которых используется алгоритм ШИМ Fixed Pulse Pattern Control. Экспериментальные исследования качества электрической энергии в распределительной сети 10 кВ на предприятии «Металлургический завод Балаково» показали, что работа электроприводов проволочных блоков с ПЧ-АВ TMEIC TMdrive-70 производства компании Toshiba Mitsubishi вызывает ухудшение качества напряжения на общих секциях заводской ЗРУ-10 кВ ГПП, при котором значение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения K_U достигало 8-11% с расчетом до 150-ой гармоники. В результате этого имели место массовые выходы из строя соседних групповых выпрямительных модулей Siemens S120 с технологией Smart, имеющих питание от общих секций заводской ГПП.

2. Сильные гармонические искажения напряжения возникают в том случае, когда резонанс токов в сети 10 кВ, образованный взаимодействием суммарной емкости кабельных линий и индуктивности сетевого трансформатора 220/35 кВ, совпадает с областью частот генерирования гармоник ПЧ TMEIC1-3 с номерами $n = 49 - 71$. Установлено, что негативное влияние с показателем $K_U = 10,8\%$, оказывает самый мощный преобразователь TMEIC №3, и оно приблизительно соответствует совместному действию двух преобразователей TMEIC №1, 2 $K_U = 10,1\%$. Работа только одного преобразователя TMEIC №1 или №2 оказывает пропорционально меньшее воздействие K_U порядка 5,5%. Показано, что работа на холостом ходу преобразователей фирмы Siemens практически не вносит дополнительных искажений в форму кривой напряжения на шинах 10 кВ.

3. Для уточненной оценки влияния резонансных явлений на качество электроэнергии сети 10 кВ на основании записанных мгновенных значений напряжений и токов была восстановлена экспериментальная частотная характеристика, в которой был выявлен резонансный максимум в диапазоне

частот, соответствующих номерам гармоник 53-65. Таким образом, значительные искажения кривой напряжения на шинах 10 кВ обусловлены перекрытием двух частотных диапазонов – диапазона в котором частотная характеристика сети имеет максимум и диапазона, в котором уровень высших гармоник генерируемых преобразователями частоты ТМЕИС составляет значительную величину (до 6%). Изменение частотного диапазона высших гармоник сетевого тока ПЧ-АВ ТМЕИС, требует коррекции параметров широтно-импульсной модуляции, что трудно осуществимо на практике, поскольку программное обеспечение алгоритмов ШИМ АВ является закрытым и требует вмешательства экспертов со стороны фирмы завода производителя преобразователей частоты Toshiba Mitsubishi.

4. Анализ экспериментальных осциллограмм напряжений и токов в распределительной сети 10 кВ показал, что применение одночастотных традиционных ФКУ, настроенных на 5 и 7 гармонику, не оказывает значимого влияния на качество электроэнергии при наличии резонансных явлений в высокочастотной области характеристики и наложении данных гармоник, генерируемых ПЧ-АВ ТМЕИС. В соответствии с этим, актуальной задачей является применение специализированных пассивных фильтров, обеспечивающих коррекцию частотной характеристики в высокочастотной области.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ АО «МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ ЗАВОД БАЛАКОВО» И ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ КЛЕТЕЙ СОРТОВОГО СТАНА НА БАЗЕ ПЧ-АВ

При определенной конфигурации сети 10 кВ внутризаводского электроснабжения АО «Металлургический завод Балаково» возникают опасные резонансные явления, приводящие к сильнейшему искажению формы напряжения на секциях ЗРУ-10 кВ ГПП. Резонанс обусловлен взаимным влиянием суммарной распределенной емкости кабельных линий и индуктивности сетевого трансформатора 220/10 кВ. Описанные искажения с высокой долей вероятности могут приводить к сбою в работе преобразователей частоты Siemens Sinamics S120, которые оснащены активными выпрямителями, функционирующими в режиме Smart, с последующим выходом из строя силовых выпрямительных модулей [1, 5, 15, 32, 40].

Для исключения подобных ситуаций необходимо провести комплексные исследования частных характеристик сети 10 кВ и разработать мероприятия по их коррекции с целью перемещения параллельного резонанса токов в другой частотный диапазон с его одновременным ослаблением. Для этого необходимо проанализировать основные рабочие конфигурации сети 10 кВ и разработать математическую модель системы электроснабжения завода, на базе которой возможно проводить исследования влияния тех или иных параметров системы на резонансный максимум [24].

3.1. Анализ конфигурации электроснабжения электроприемников 10 кВ металлургического завода АО «Металлургический завод Балаково»

За время работы металлургического завода электротехническими персоналом были разработаны и апробированы два основных варианта конфигурации системы электроснабжения электроприемников 10 кВ:

1. Первый вариант предусматривает раздельную работу секций №1 и №2 ЗРУ-10 кВ и включение двух трансформаторов Т1 и Т2. В данном случае секционный выключатель СРВ10-17 отключен. От секции №1 ЗРУ-10 кВ запитаны: РП-3 ЭСПЦ (все секции), РП-2 водоподготовка (все секции), РП-1 скрапное отделение (1 секция), РУ-10 кВ БВР. От секции №2 запитаны: РП-4 МЕСО1, МЕСО2 (обе секции), РП-5 газоочистка (обе секции). Кабельные линии 10 кВ на незадействованных фидерах секций №1 и №2 под напряжением (кроме ф.2, ф.21, ф.31). Питание секции Т от ТЭЦ-4. Данный вариант конфигурации СЭС применялся с момента запуска завода вплоть до периода времени, когда стали происходить массовые выходы из строя преобразователей частоты Siemens электроприводов прокатного стана (весна 2015 г.). Схема электроснабжения завода с указанием положений выключателей, соответствующих схеме 2015 г. с раздельной работой секций №1 и №2 ЗРУ-10 кВ ГПП, приведена на рисунке 3.1.

2. Второй вариант предусматривает совместную работу секций №1 и №2 ЗРУ-10 кВ ГПП с питанием от трансформатора Т2. В этом случае секционный выключатель СРВ10-17 включен. От секции №1 ЗРУ-10 кВ запитаны: РП-3 ЭСПЦ (все секции), РП-2 водоподготовка (все секции), РП-1 скрапное отделение (1 секция), РУ-10 кВ БВР, РП-4 МЕСО2 (обе секции), РП-5 газоочистка (обе секции). От секции №2 запитаны: РП-4 МЕСО1. Кабельные линии 10 кВ на незадействованных фидерах секций №1 и №2 под напряжением (кроме ф.2, ф.31). Питание секции Т от ТЭЦ-4. Схема электроснабжения, соответствующая второму варианту, приведена на рисунке 3.2. Данный вариант схемы используется в настоящее время.

3.2 Разработка имитационной модели системы внутривозовского электроснабжения АО «Металлургический завод Балаково» с ПЧ-АВ

Метод экспериментального определения подходит для действующих производств, где существенно изменить существующую конфигурацию системы электроснабжения невозможно, и необходим поиск решений по обеспечению заданного качества электроэнергии.

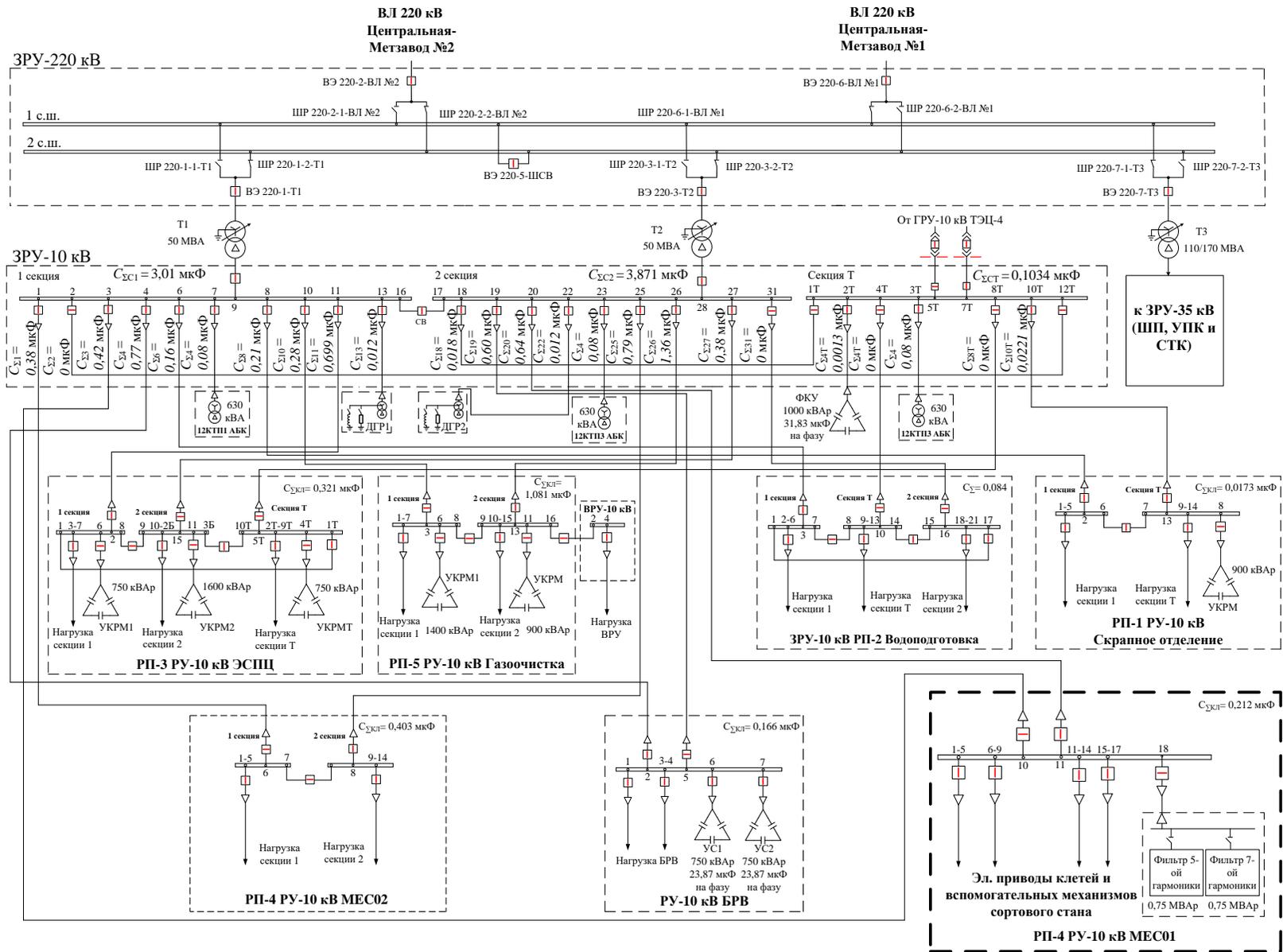


Рисунок 3.1 - Схема электроснабжения АО «Металлургический завод Балаково» с указанием положений выключателей, соответствующих схеме 2015 г. с отдельной работой секций №1 и №2 ЗРУ-10 кВ ГПП

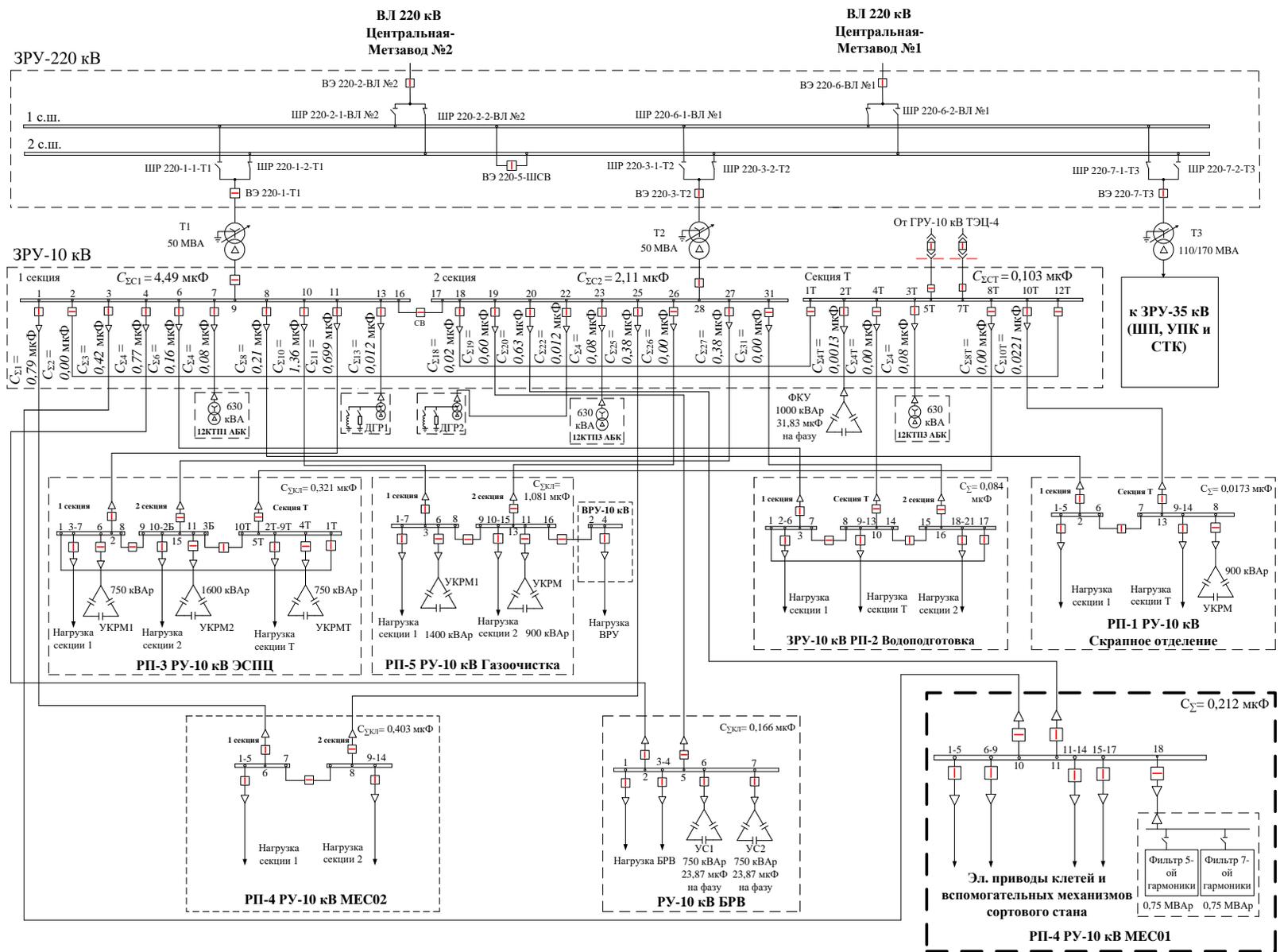


Рисунок 3.2 - Схема электроснабжения АО «Металлургический завод Балаково» с указанием положений выключателей, соответствующих схеме 2016 г. с совместной работой секций №1 и №2 ЗРУ-10 кВ ГПП

В случае заново проектируемого предприятия или при модернизации действующего целесообразно воспользоваться методами математического или имитационного моделирования для профилактики проблем с ЭМС электроприводов с АВ большой мощности.

В качестве среды для имитационного моделирования может быть использован математический пакет MATLAB с приложением SIMULINK [112-114]. Данный программный продукт имеет библиотеку SimPowerSystem, позволяющую моделировать основные компоненты системы электроснабжения, такие как кабельные линии, трансформаторы и управляемые источники напряжения для имитации работы АВ либо готовые блоки выпрямительных модулей (рисунки 3.4 – 3.8).

Для корректного построения модели необходимо знать такие параметры как индуктивность рассеяния трансформатора, протяженность, распределенная индуктивность и емкость кабельных линий. Также необходимо знать параметры алгоритма ШИМ, применяемого в моделируемом АВ.

Для анализа частотных характеристик при различных конфигурациях сети 10 кВ в математическом пакете Matlab с приложением Simulink была разработана имитационная модель системы электроснабжения завода (рисунки 3.4 – 3.8). В модели были учтены параметры питающей сети 220 кВ и сетевых трансформаторов Т1 и Т2 220/10 кВ. Также были реализованы схемы ЗРУ-10 кВ и всех РУ-10 кВ цеховых РП. Была разработана математическая модель ПЧ ТМЕІС1-3 в виде управляемых источников напряжения, адекватно воспроизводящая гармонический состав токов, потребляемых преобразователями. Кроме этого, реализована эквивалентная модель ПЧ Siemens Sinamics S120 в виде группы источников тока, параметры которых задавались на основании гармонического анализа суммарного тока всех клетевых блоков, полученного в ходе экспериментальных исследований. Остальные электроприемники цеховых РП были представлены эквивалентными линейными моделями в виде активно-индуктивных сопротивлений с фиксированными параметрами.

Для адекватного анализа частотных характеристик при моделировании кабельных линий были использованы П-образные схемы замещения с учетом активного сопротивления, индуктивности и сосредоточенных емкостей в начале и конце линии, так называемые «П-секции». Параметры П-секций задавались на основе известных удельных параметров R_0 , L_0 и C_0 , определенных из справочников и каталогов в соответствии с марками кабелей, а также согласно фактическим длинам кабелей и числу параллельных ниток [115].

С помощью имитационного моделирования можно, благодаря встроенной функции **Impedance Measurement**, получить частотную характеристику (рисунок 3.3) исследуемой сети и отследить опасные резонансные явления, которые сложно получить, опираясь лишь на простые математические зависимости.

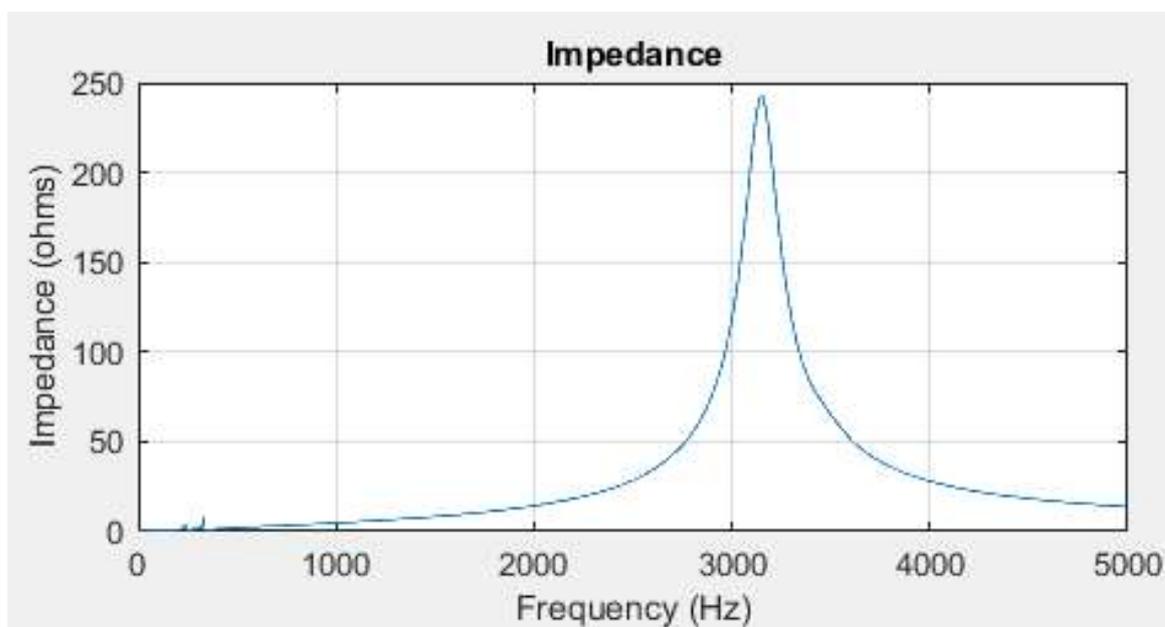


Рисунок 3.3 - Обработка результатов моделирования с помощью математического пакета MATLAB и функции **Impedance Measurement**

В описанных во второй главе случаях запись осциллограмм мгновенного значения напряжения проводилась с помощью специальных измерительных комплексов на основе регистраторов электрических сигналов Elspec G4420 и FLASH-Recorder с частотой дискретизации 100 кГц. Запись осциллограмм сохраняется в виде массива данных, пригодного для дальнейшей математической обработки.

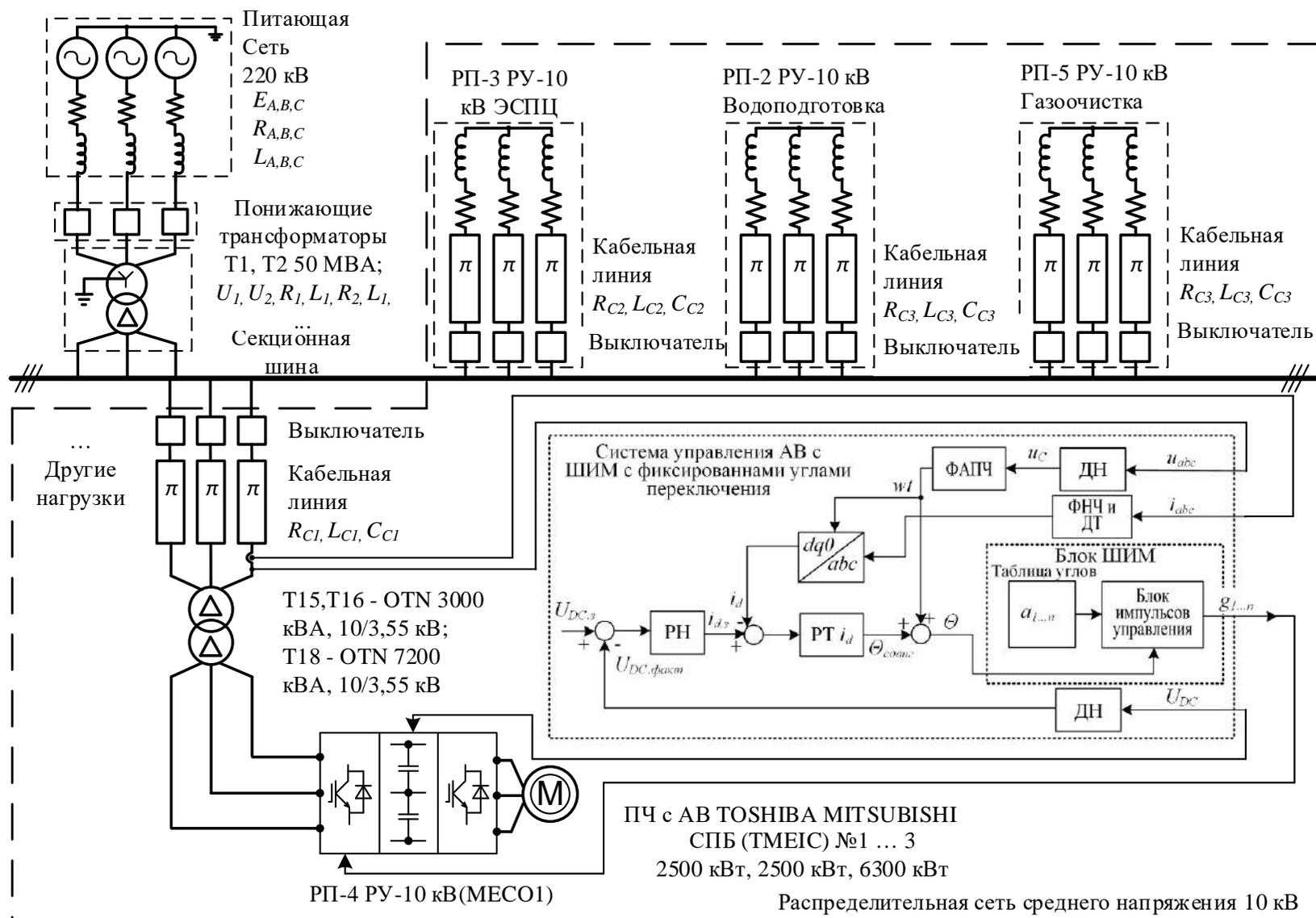


Рисунок 3.4 - Фрагмент имитационной модели системы электроснабжения электроприемников 10 кВ АО «Металлургический завод Балаково», имитирующий работу активного выпрямителя.

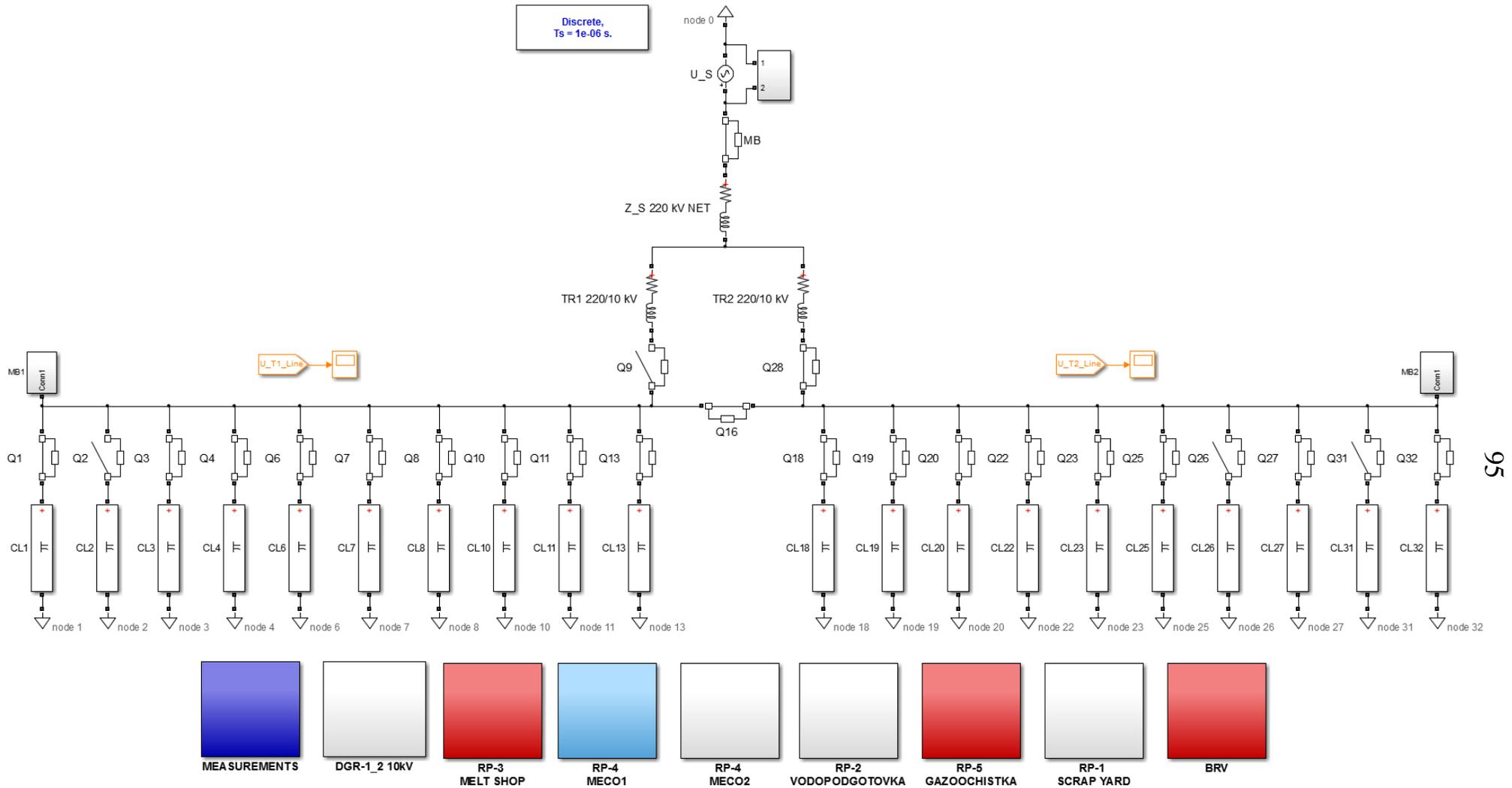


Рисунок 3.5 - Имитационная модель системы электроснабжения электроприемников 10 кВ АО «Металлургический завод Балаково», реализованная в математическом пакете Matlab с приложением Simulink

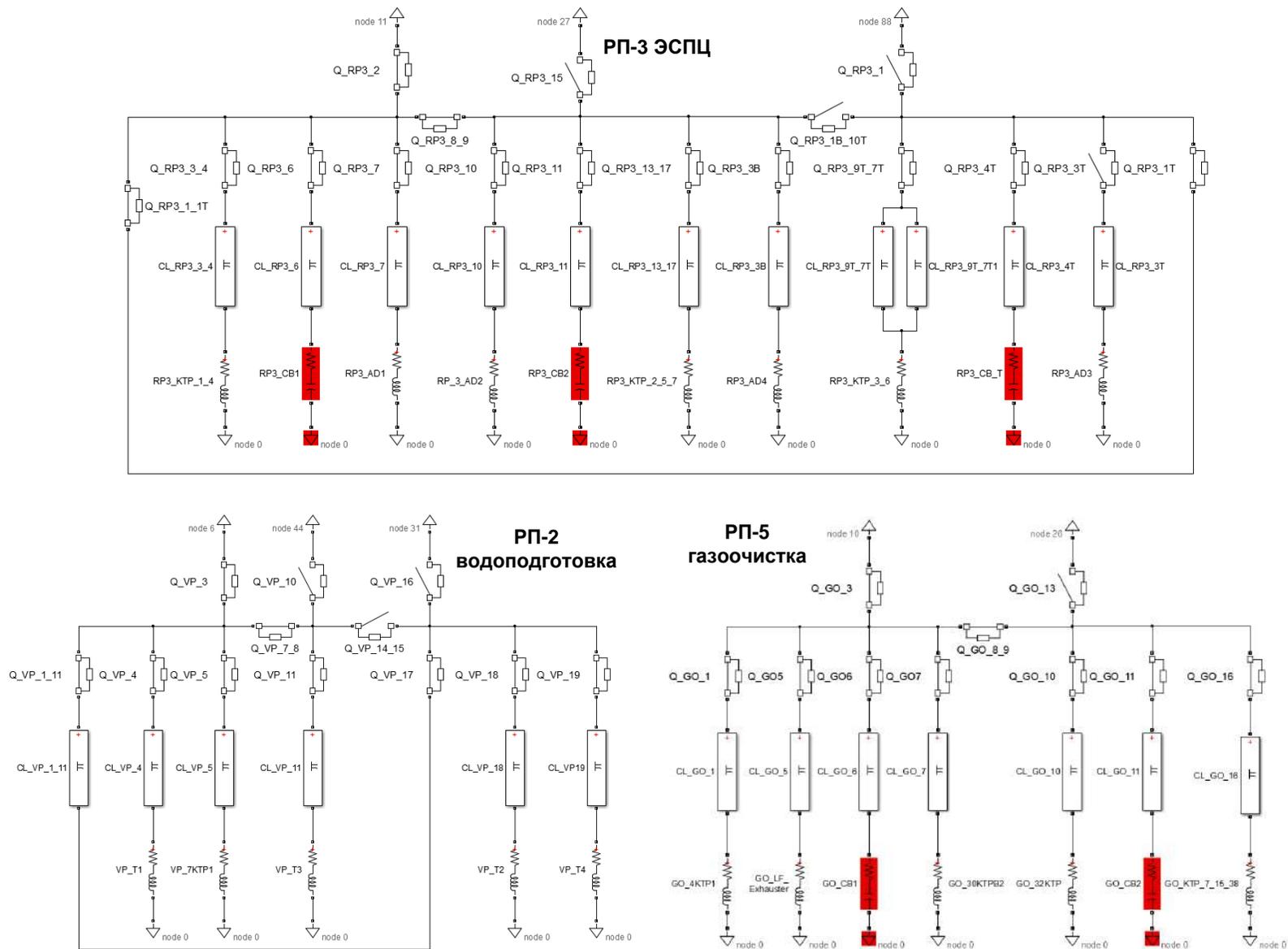


Рисунок 3.6 - Имитационные модели РП-3 «ЭСПЦ», РП-2 «Водоподготовка», РП-5 «Газоочистка»

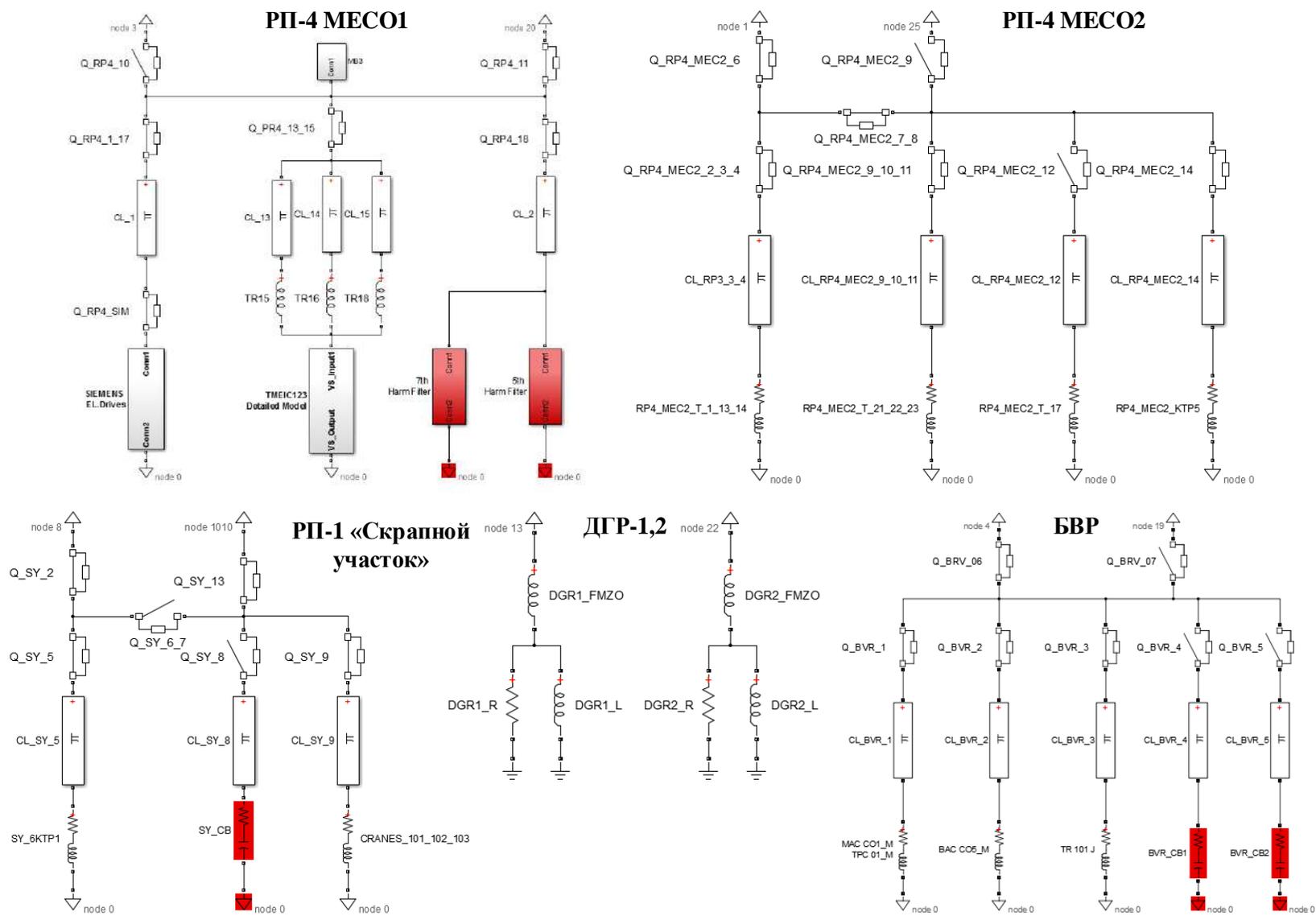


Рисунок 3.7 - Имитационные модели РП-4 МЕСО1,2, РП-1 «Скrapной участок», БВР и ДГР-1,2

Следующим шагом необходимо произвести математическую обработку полученных результатов. Для этого может быть использован математический пакет MATLAB, через который осуществляется импорт данных в удобный для математических операций формат. Далее, с помощью встроенной функции **FFT Analyze** производится спектральный анализ полученных данных с выводом результирующего K_U рисунок 3.8. Данная функция также используется при математическом моделировании имитационной модели АО «Металлургический завод Балаково» (рисунок 3.4 – 3.7), для получения наглядных результатов в виде мгновенных значений линейных напряжений и гармонического состава линейного напряжения при различных конфигурациях внутривозовских схем электроснабжения.

Граница диапазона анализируемого спектра определяется эмпирически и зависит от конкретных условий работы электрооборудования. В описанных случаях была определена граница до 150 гармоники. Амплитуда сигналов с частотой выше указанного диапазона незначительна и не влияла на значение результирующего K_U .

Интерпретация полученных результатов может быть осуществлена следующим образом: если $K_U (150)$ больше установленного стандартами максимально допустимого значения $K_U (40)$ равного 5-8%, то высока вероятность возникновения проблем с ЭМС АВ с питающей сетью и необходимо принимать специальные меры по обеспечению электромагнитной совместимости. Такими мерами могут быть: выделение “грязной” секции на главной понизительной подстанции предприятия для питания АВ и “чистой” секции для питания чувствительных к качеству энергии электроприемников; применение специальных фильтров коррекции частотной характеристики сети для уменьшения импеданса в области генерирования гармоник АВ; изменение таблиц с углами переключения вентиля в контроллере ШИМ, для изменения состава генерируемых гармоник с целью обойти опасную высокоомную область в частотной характеристике.

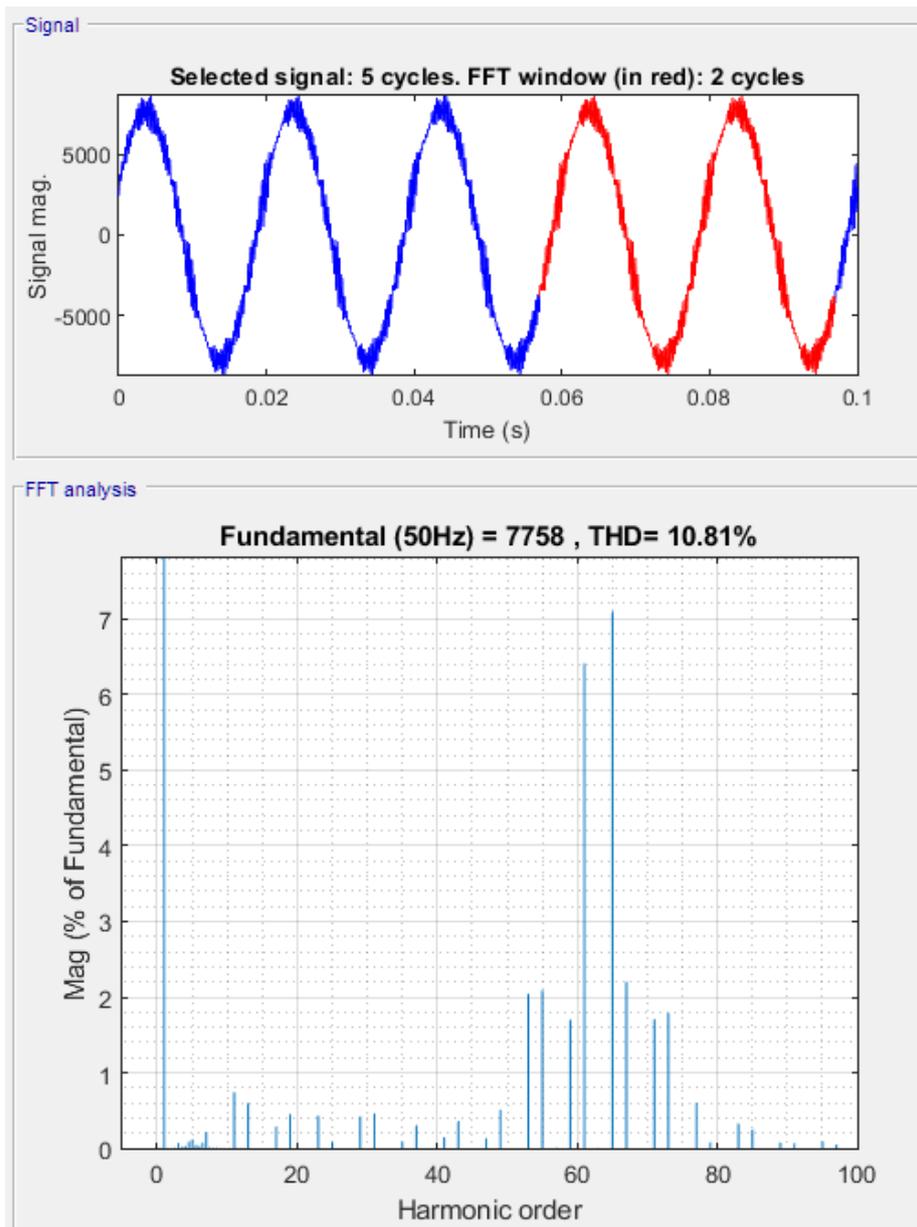


Рисунок 3.8 - Обработка результатов экспериментов с помощью математического пакета MATLAB и функции FFT Analyze

3.3. Разработка имитационной модели ПЧ-АВ ТМЕИС с ШИМ Fixed Pulse Pattern Control в составе электропривода скоростных проволочных блоков

Главная сложность при имитационном моделировании заключается в получении информации о применяемых производителями преобразовательной техники алгоритмах ШИМ АВ, поскольку зачастую данная информация является коммерческой тайной [112].

Задачей активного выпрямителя является формирование на его входных зажимах напряжения, полученного из напряжения звена постоянного тока методом ШИМ. Это входное напряжение должно иметь первую гармонику определенной величины, а его фазовый сдвиг по отношению к сетевому напряжению должен обеспечить протекание токов от сети в активный выпрямитель и, тем самым, обеспечить передачу мощности из сети в звено постоянного тока.

Рассмотрим следующую систему: трехфазную сеть с напряжением 10 кВ, преобразовательный трансформатор, и собственно активный выпрямитель (рисунок 3.9, а). Схема замещения рассматриваемой системы показана на рисунке 3.9, б. Здесь сеть представлена двумя источниками линейных ЭДС E_{AB} и E_{BC} , трансформатор рассматривается по упрощенной схеме - как трехфазная продольная индуктивность L , активный выпрямитель также представлен в виде двух линейных напряжений на своих входных зажимах U_{AB} и U_{BC} . Все элементы приведены к одному напряжению, например, напряжению сети.

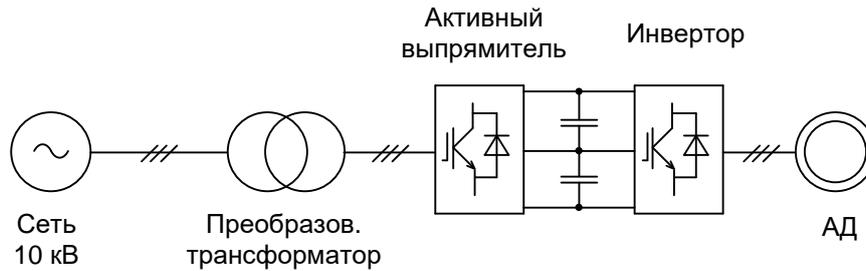
В результате проведенных экспериментов имеется осциллограмма одного фазного тока. Требуется на ее основе восстановить кривую линейного напряжения на входных зажимах активного выпрямителя.

Примем следующее допущение – кривые токов трех фаз одинаковы по форме и сдвинуты друг относительно друга на угол 120 эл. градусов. Тогда путем соответствующего сдвига тока одной фазы возможно получить ток в другой фазе.

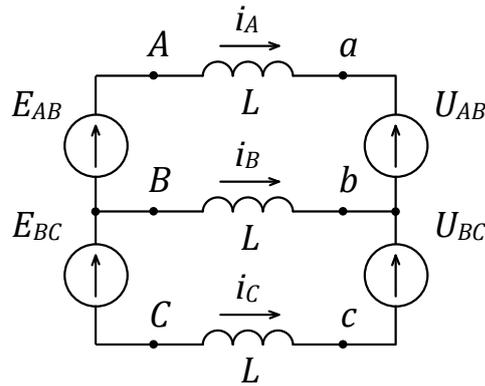
Рассмотрим в схеме рисунок 3.9, б следующий контур – AabB и запишем для него уравнение баланса напряжений:

$$E_{AB} - U_{AB} = L \frac{d}{dt} (i_A - i_B). \quad (3.1)$$

откуда следует, что для восстановления кривой линейного напряжения U_{AB} на входных зажимах активного выпрямителя требуется проинтегрировать разность двух фазных токов $(i_A - i_B)$, а затем с некоторым коэффициентом прибавить к ним синусоидальное линейное напряжение сети E_{AB} .



а)



б)

Рисунок 3.9 - Присоединение активного выпрямителя через преобразовательный трансформатор к сети 10 кВ (а), схема замещения рассматриваемой системы (б)

На рисунке 3.10 показаны цветом следующие кривые: красный – ток фазы А, записан экспериментально; синий – ток фазы В, получен сдвигом на треть периода тока фазы А; зеленый – разность токов фаз А и В; розовый – производная по времени от разности токов; коричневый – синусоида напряжения сети, амплитуда и фаза подбираются итерационно; темно-синий – восстановленная кривая линейного напряжения на входных зажимах активного выпрямителя.

На рисунке 3.11 в увеличенном масштабе по времени показаны кривые токов и линейное напряжение U_{AB} . Анализ представленных кривых показывает, что переключение силовых транзисторов активного выпрямителя и связанное с этим ступенчатое изменение линейного напряжения вызывают излом в кривой фазного тока – смену знака производной тока. Однако, как было отмечено выше, указанная связь справедлива только для разностного тока ($i_A - i_B$), действительно, на рисунке красным отмечены участки, на которых каждый фазный ток i_A, i_B

имеет излом в своей кривой, тем не менее, накладываясь друг на друга, они взаимокompенсируются и в кривой разностного тока – отсутствуют. Кривые на рисунке 3.11 дают четкое представление, какие изломы кривой фазного тока следует брать в рассмотрение при определении углов переключения, фигурирующих в кривой линейного напряжения (обведены в прямоугольник).

На рисунке 3.12 представлены два фазных напряжения U_A и U_B активного выпрямителя и линейное напряжение U_{AB} , полученное расчетным путем на их основе. Кружочками и стрелочками показаны связи между переключениями в кривой линейного напряжения и соответствующими переключениями в фазных напряжениях. Кривую линейного напряжения можно рассматривать как ступенчатую – четыре ступени при движении от отрицательной полярности к положительной и столько же при движении в обратную сторону.

На рисунке 3.12 в прямоугольник обведены четыре ступени из которых первые две обусловлены переключениями ключей в фазе В (при движении от отрицательной полярности к положительной), следующие две ступени в кривой U_{AB} обусловлены переключениями ключей в фазе А (при движении от положительной полярности к отрицательной). Если считать, что фазные напряжения активного выпрямителя симметричны и сдвинуты друг относительно друга на угол 120 электрических градусов, то для восстановления углов переключения достаточно рассмотреть только одну пару ступенек в кривой линейного напряжения.

На рисунке 3.13 представлены осциллограммы тока фазы А и восстановленного линейного напряжения U_{AB} ; над кривой тока вынесены экспериментально найденные расстояния по оси времени между двумя соседними изломами кривой тока, единица измерения представленных числовых значений 10^{-5} с. Указанные числовые значения далее сведены в таблице 3.1. В таблице представлены данные для двух режимов работы: холостого хода и режима работы под нагрузкой, соответствующие осциллограммы тока фазы А показаны на рисунке 3.14. Данные приведены для нескольких периодов питающего напряжения – 5 периодов.

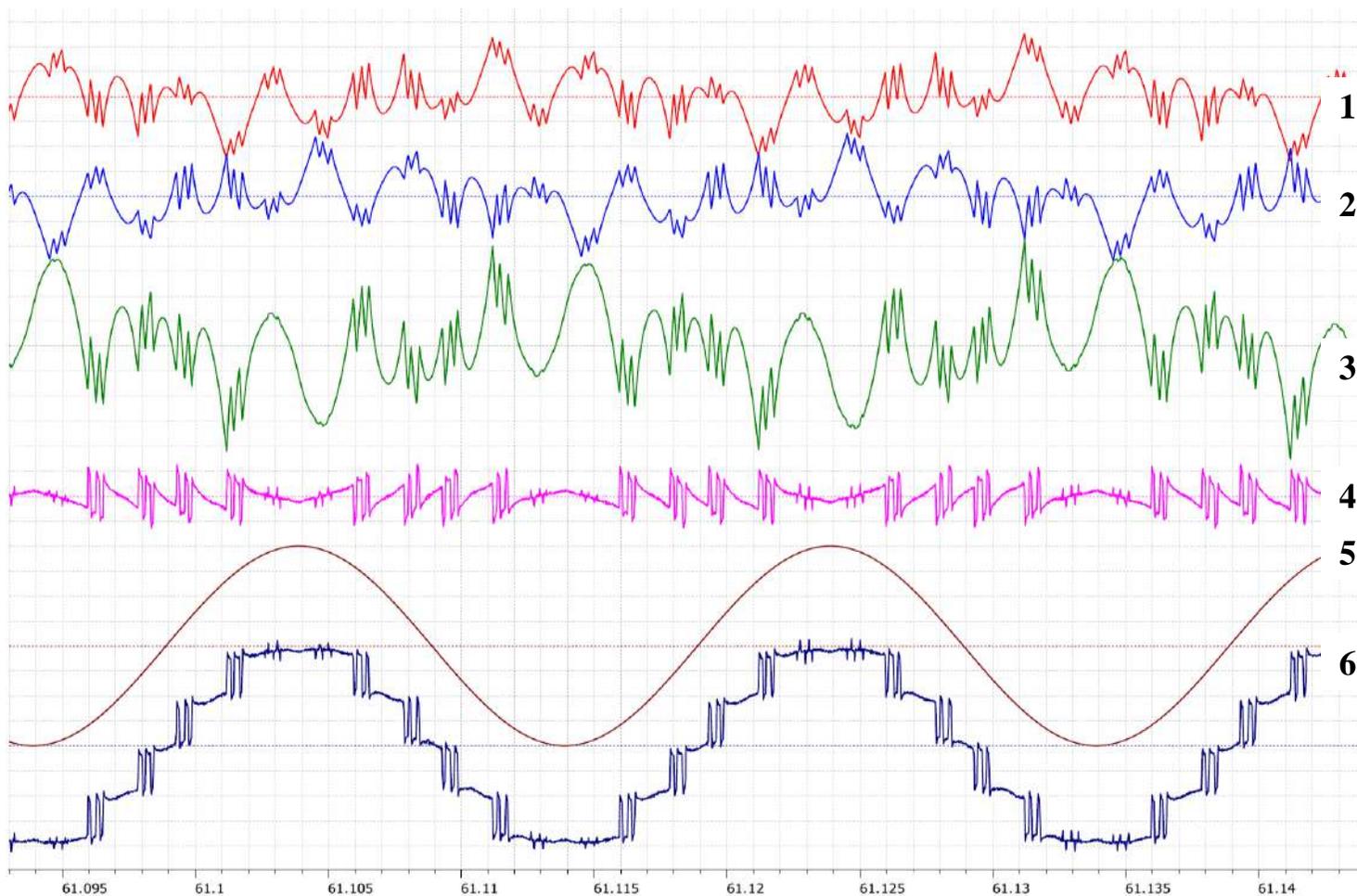


Рисунок 3.10 - Осциллограммы токов и напряжений активного выпрямителя

Обозначения сигналов (сверху-вниз): красный (1) – ток фазы А, записан экспериментально; синий (2) – ток фазы В, получен сдвигом на треть периода тока фазы А; зеленый (3) – разность токов фаз А и В; розовый (4) – производная по времени от разности токов; коричневый (5) – синусоида напряжения сети, амплитуда и фаза подбирается итерационно; темно-синий (6) – восстановленная кривая линейного напряжения на входных зажимах активного выпрямителя.

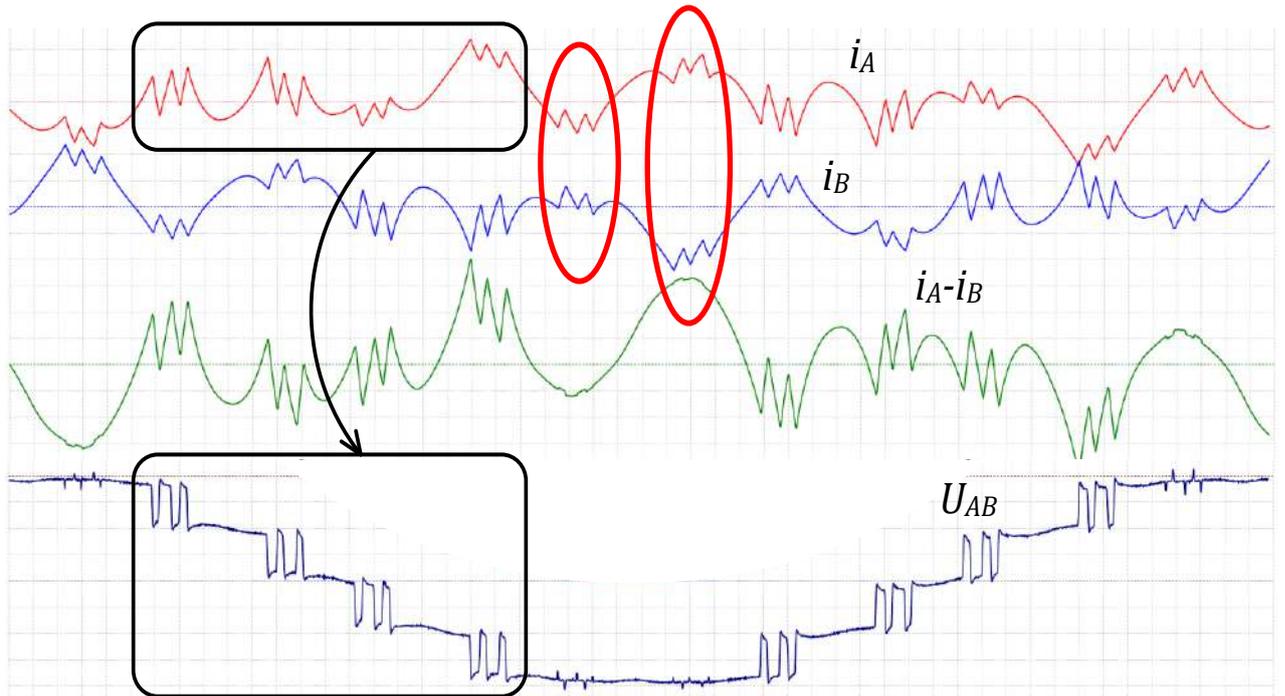


Рисунок 3.11 - Фрагмент осциллограмм токов и напряжений, позволяющий установить взаимосвязь между переключениями в кривой линейного напряжения и изломами в кривой тока

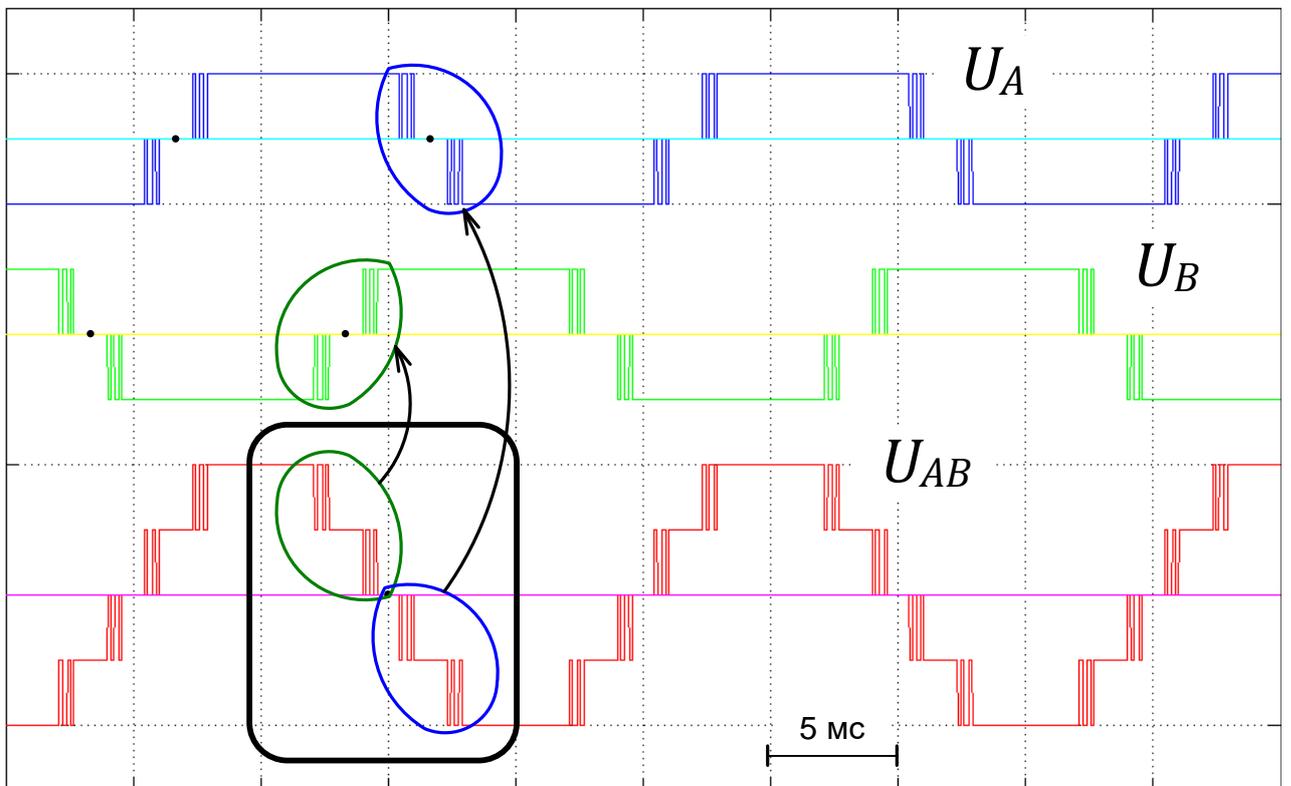
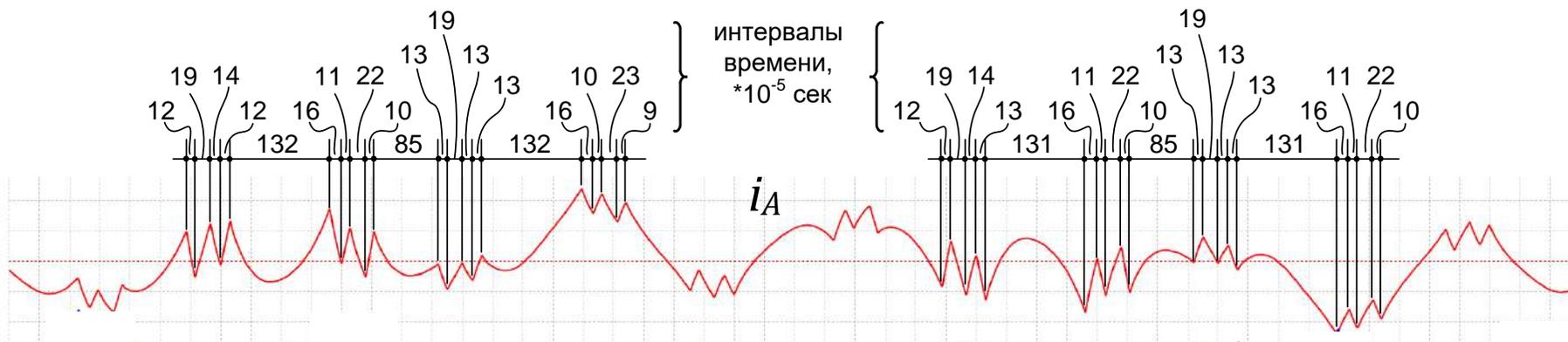
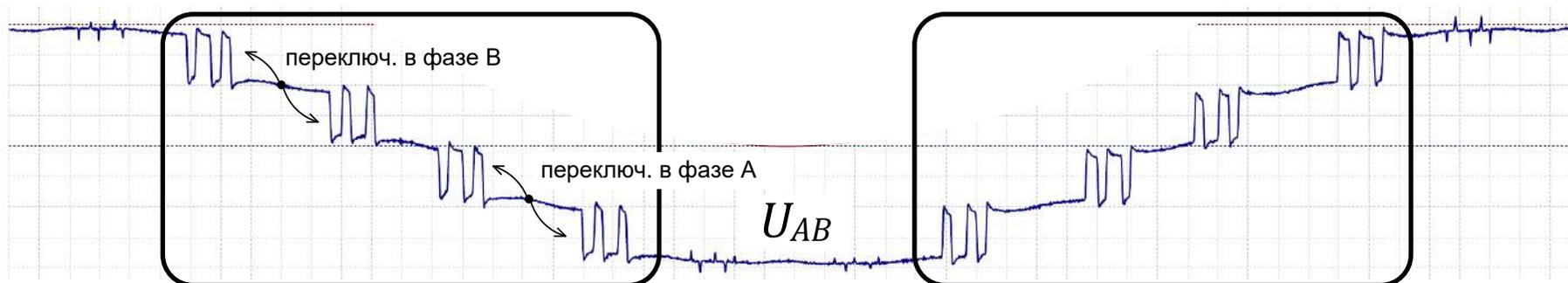


Рисунок 3.12 - Графики фазных напряжения U_A и U_B активного выпрямителя и линейное напряжение U_{AB} (расчет)



а



б

Рисунок 3.13 - Осциллограммы тока фазы А и восстановленного линейного напряжения U_{AB}

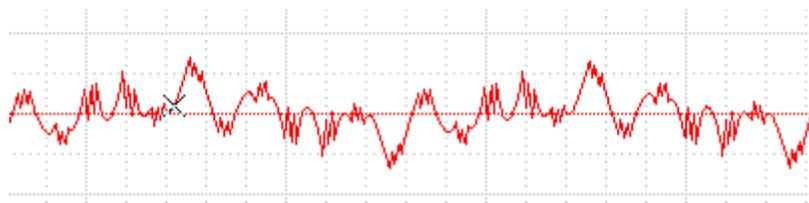
а - осциллограмма тока фазы А с указанием на ней временных интервалов между изломами в кривой;

б - осциллограмма восстановленного линейного напряжения U_{AB} .

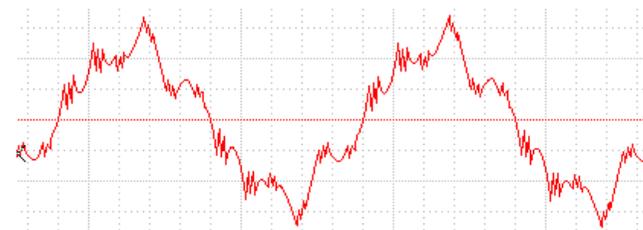
Таблица 3.1 - Экспериментально определенные по кривой тока длительности между переключениями силовых транзисторов активного выпрямителя

№ периода	Холостой ход																		
	Переключения в фазе В										Переключения в фазе А								
1	12	20	13	13	131	16	11	22	10	85	13	19	14	12	132	16	12	21	10
2	12	20	13	13	131	16	11	22	10	85	13	19	14	12	132	16	11	21	11
3	12	20	13	13	132	15	12	21	10	85	13	19	14	12	132	16	11	22	10
4	12	20	13	13	132	16	11	21	10	85	12	19	14	12	132	16	11	21	11
5	12	20	13	13	131	16	11	21	11	85	13	19	14	12	132	16	11	21	10
среднее	12	20	13	13	131,4	15,8	11,2	21,4	10,2	85	12,8	19	14	12	132	16	11,2	21,2	10,4
№ периода	Под нагрузкой																		
	Переключения в фазе В										Переключения в фазе А								
1	13	18	14	13	131	16	11	22	10	85	14	17	15	12	132	16	11	23	9
2	13	18	15	12	131	16	11	22	10	86	13	18	14	13	131	16	10	23	9
3	14	17	15	12	132	16	11	22	10	85	13	18	15	12	131	16	11	22	10
4	14	17	15	12	132	16	11	22	10	85	13	18	14	13	131	16	10	23	9
5	13	18	15	12	131	16	11	22	10	85	14	18	14	12	131	16	11	22	10
среднее	13,4	17,6	14,8	12,2	131,4	16	11	22	10	85,2	13,4	17,8	14,4	12,4	131,2	16	10,6	22,6	9,4

Примечание - Единица измерения представленных числовых значений 10^{-5} с.



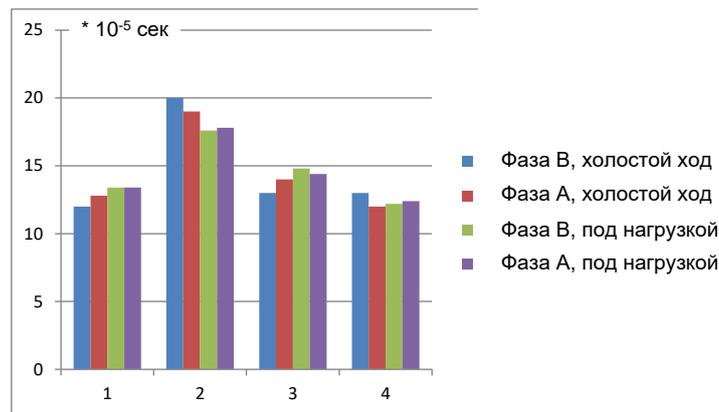
холостой ход



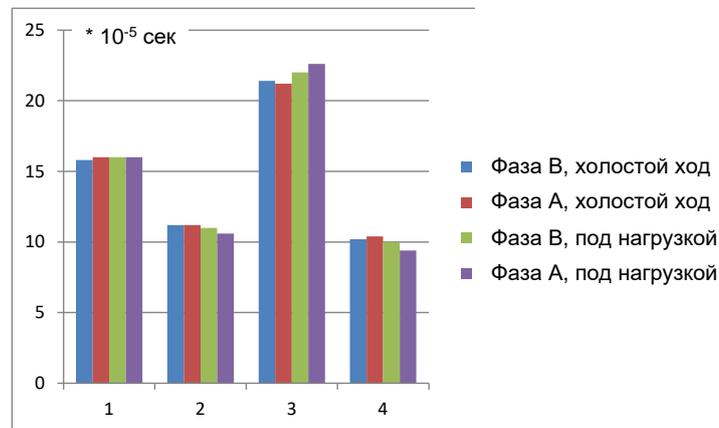
режим работы под нагрузкой

Рисунок 3.14 - Осциллограммы тока в режиме холостого хода и под нагрузкой

Анализ экспериментальных данных показывает, что в рамках одного режима отклонения длительностей от периода к периоду не превышают единицы младшего разряда, что говорит о хорошей повторяемости результатов и позволяет ограничить выборку небольшим числом – 5. В таблице 3.1 также представлены средние значения длительностей, по которым на рисунке 3.15 построены столбчатые диаграммы, из которых следует, что, несмотря на незначительные отклонения длительностей между двумя режимами/фазами, их можно усреднить и в итоге рассматривать только одно среднее значение.



а)



б)

Рисунок 3.15 - Столбчатые гистограммы средних значений длительностей между переключениями транзисторов для двух режимов – холостой ход и режим работы под нагрузкой и двух фаз А и В

а - длительности между переключениями, соответствующие углам переключения

$\beta_1 - \beta_5$; б - длительности между переключениями, соответствующие углам

переключения $\alpha_1 - \alpha_5$

Введем в рассмотрение кривую фазного напряжения активного выпрямителя (рисунок 3.16).

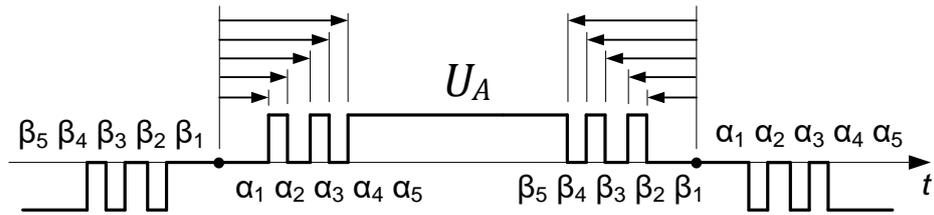


Рисунок 3.16 - Фазное напряжение активного выпрямителя по методу ШИМ – Fixed Pulse Pattern Control

Кривая фазного напряжения обладает симметрией на положительной и отрицательной полуволнах. Однако, как следует из гистограмм на рисунке 3.15, она не обладает симметрией относительно середины положительного или отрицательного полупериодов. В связи с этим совокупность углов переключений содержит два набора: α_1 - α_5 для первой половины полупериода, и β_1 - β_5 для второй половины полупериода. Указанные углы были получены на основе средних значений длительностей из таблицы 3.1 и представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 - Углы переключения транзисторов активного выпрямителя ТМЕИС по методу ШИМ Fixed Pulse Pattern Control

Длительности, 10^{-5} с	12,9	18,6	14,05	12,4	131,5	15,95	11	21,8	10
Углы, электрические градусы	22,27	19,94	16,60	14,07	11,84	14,71	16,69	20,61	22,41
Обозначения	β_5	β_4	β_3	β_2	$\beta_1 = \alpha_1$	α_2	α_3	α_4	α_5

Формула, по которой рассчитываются углы в электрических градусах, имеет следующий вид:

$$\alpha_{n+1} = \alpha_n + \Delta t \cdot \frac{360^\circ \cdot 10}{20000} = \alpha_n + \Delta t \cdot 0,18, \quad (3.2)$$

где α_{n+1} и α_n - два угла, следующих по порядку друг за другом;

Δt - длительность промежутка времени между ними, 10^{-5} с;

20000 – длительность периода питающего напряжения, мкс.

Анализ данных из таблицы 3.2 показывает, что, несмотря на то, что для двух наборов длительности отличаются, однако углы переключения, полученные на их основе, практически совпадают, это подтверждают столбчатые диаграммы на рисунке 3.17.

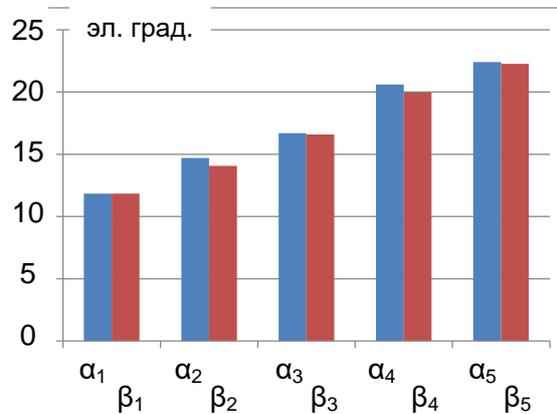


Рисунок 3.17 - Экспериментально определенные углы переключения транзисторов активного выпрямителя по методу ШИМ Fixed Pulse Pattern Control

С использованием экспериментально определенных углов переключения IEGT-транзисторов АВ преобразователей частоты TMEIC TMdrive-70, полученных в ходе проведенных исследований, в математическом пакете Matlab с приложением Simulink были реализованы имитационные модели активных выпрямителей, состоящие из управляемых источников напряжения, включенных последовательно с моделями понизительных трансформаторов T15, T16, T18, учитывающих параметры трансформаторов, количество вторичных обмоток и их группу соединения, а также кабельных линий от РУ-10 кВ РП-4 МЕСО1 до данных трансформаторов. Данные комплексы из вышперечисленных элементов, полученные для каждого ЭП скоростных проволочных блоков, были интегрированы в разработанную ранее модель распределительной сети 10 кВ района ЗРУ-10 кВ.

Широтно-импульсная модуляция с фиксированными углами переключения отличается от традиционных алгоритмов тем, что углы переключения силовых модулей рассчитываются заранее, а не в режиме реального времени как в других алгоритмах. Углы переключения ключей рассчитываются на основании критерия минимальной величины потерь в полупроводниковых ключах и ограничения

высших гармонических тока, генерируемых в сеть преобразователем – минимальное значение суммарного коэффициента искажения тока. Углы переключения состоят из двух комплектов для положительной и отрицательной полуволн, так как кривая фазного напряжения не обладает симметрией относительно середины положительного и отрицательного полупериодов. Данные углы рассчитываются на основе средних значений длительностей между переключениями. Особенностью данного алгоритма является то, что регулирование напряжения в ЗПТ ПЧ осуществляется не за счёт изменения коэффициента модуляции, а за счёт изменения фазы формируемого на входе АВ напряжения фиксированной величины по отношению к фазе напряжения питающей сети, т.е. регулирование активной составляющей тока АВ осуществляется за счёт изменения реактивной составляющей тока [26, 28].

На рисунке 3.4 представлена имитационная модель преобразователя частоты с активным выпрямителем фирмы Toshiba Mitsubishi-Electric Industrial Corporation (ТМЕИС ТМdrive-70), позволяющая на основе полученных углов переключения, в ходе проведенных экспериментальных исследований на металлургическом заводе АО «Металлургический завод Балаково», воспроизвести кривую линейного напряжения, фазного тока (рисунок 3.18), и получить гармонический состав напряжения (рисунок 3.19).

Сигналы для управляемых источников напряжения, моделирующих напряжение на входе активных выпрямителей, формируются в упрощенной модели системы управления АВ, включающей в себя ПИ-регулятор тока ортогональных составляющих (РТ I_d) по оси d входного тока АВ, датчики напряжения питающей сети (ДН), блок фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), фильтр нижних частот (ФНЧ) для фильтрации сигналов обратных связей по ортогональным составляющим тока, блок преобразования координат $abc/dq0$.

На рисунке 3.4 приведена упрощённая функциональная схема системы управления АВ при использовании алгоритма ШИМ с фиксированными углами переключения. Внутренний контур состоит только из одного ПИ-регулятора тока по ортогональной оси d . Выход регулятора тока формирует угол сдвига $\theta_{сдвиг}$ по

отношению к фазе напряжения питающей сети. В блоке ШИМ сохранены значения углов переключения в специальной таблице. В зависимости от угла θ требуемого вектора напряжения на входе АВ и значений углов переключения формируются импульсы управления полупроводниковыми вентилями [26, 28].

При имитационном моделировании режимы работы активных выпрямителей (работа на холостом ходу и под нагрузкой) реализовывались за счет задания соответствующих амплитудных значений активной составляющей тока $I_{d.3}$, определенных на основании анализа экспериментальных осциллограмм токов ЭП скоростных проволочных блоков (СПБ) с ПЧ ТМЕИС с учетом коэффициентов трансформации силовых трансформаторов. Другими словами, величины задания $I_{d.3}$ для каждого АВ ЭП СПБ принимались равными амплитудным значениям первых гармоник тока, вычисленных ранее при разложении в ряд Фурье экспериментальных осциллограмм токов на входе АВ [26, 28].

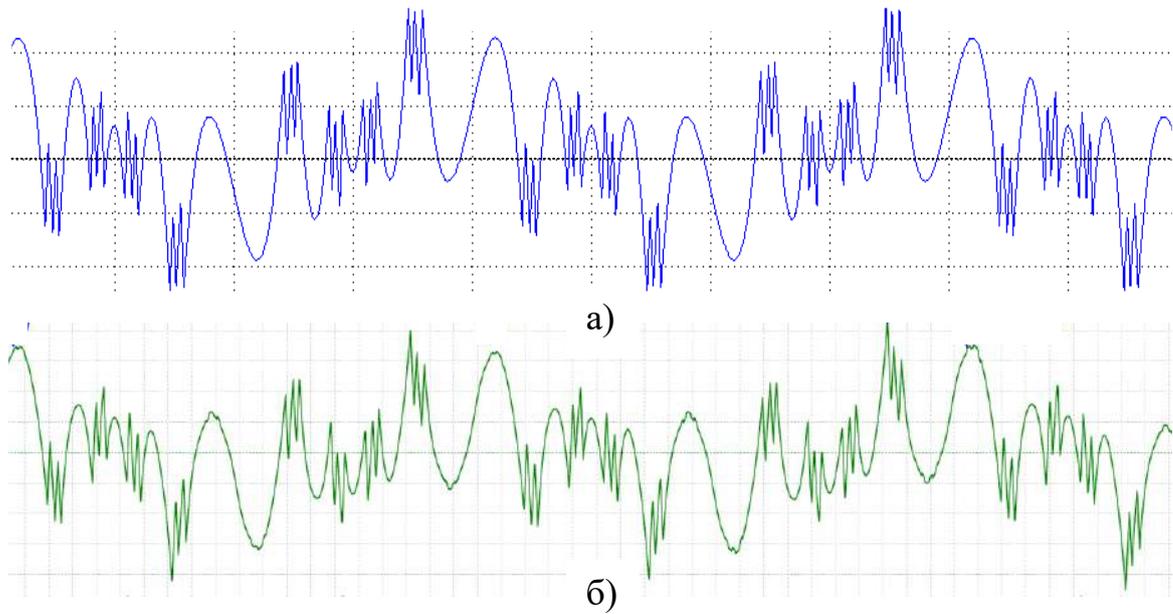
Анализ гармонического состава линейного напряжения (рисунок 3.19) на входных зажимах активного выпрямителя U_{AB} позволяет сделать следующие выводы:

- в спектре присутствуют две группы гармоник с номерами: в низкочастотной области 5,7,11,13 и т.д. и в среднечастотной области 53, 55, ..., 71,73, 77;

- амплитуды среднечастотных гармоник (показаны красным цветом) достигают 6% и почти в 2 раза превышают среднее значение амплитуд низкочастотных гармоник;

- порядковые номера (частоты) среднечастотных гармоник на зажимах активного выпрямителя совпадают с номерами (частотами) гармоник зарегистрированными экспериментально в кривой линейного напряжения на шинах 10 кВ РП-4 в режиме резонанса (рисунок 3.19) [32, 40].

Анализ кривых тока, представленных на рисунке 3.18, показывает их высокую степень соответствия, что говорит о том, что расчетные углы переключения транзисторов активного выпрямителя получены с высокой точностью и адекватно описывают работу исследуемого устройства.



а) - расчетная кривая, б) - экспериментальная кривая

Рисунок 3.18 - Сравнительный анализ кривых фазного тока

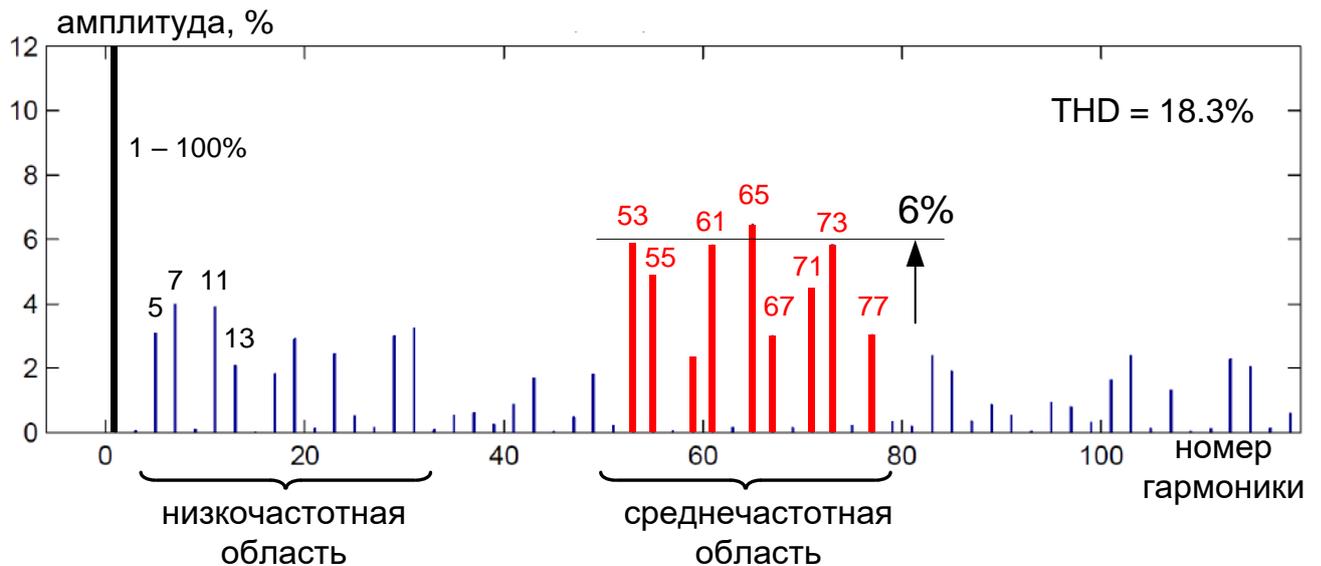


Рисунок 3.19 - Гармонический состав линейного напряжения на входных зажимах активного выпрямителя U_{AB} (расчет)

3.4. Проверка адекватности комплексной имитационной модели системы внутризаводского электроснабжения АО «Металлургический завод Балаково» с ПЧ-АВ

Для дальнейшего использования имитационной модели системы внутризаводского электроснабжения АО «Металлургический завод Балаково» с

целью улучшения ЭМС мощных ПЧ-АВ ТМЕИС с распределительной сетью 10 кВ, необходимо выполнить проверку адекватности и соответствия вновь моделируемых процессов экспериментальным показателям, полученным в ходе исследований на предприятии.

Во второй главе подробно описано проведение экспериментов по получению важных параметров показателей качества электроэнергии, а именно: осциллограмм мгновенного значения напряжения и тока; гармонического состава напряжения и тока. Данные исследования производились с помощью двух специальных измерительных комплексов на основе регистраторов электрических сигналов Elspec G4420 и FLASH-Recorder. Произведенный анализ коэффициентов нелинейного искажения K_U и K_I , спектрограмм гармоник напряжения и тока, полученным при помощи двух регистраторов позволяет судить о полной сходимости результатов.

Также с использованием результатов экспериментальных и имитационных исследований была осуществлена проверка адекватности разработанной имитационной модели. За основу, для сравнения результатов, был взят режим отдельной работы секций распределительного устройства РП-4 МЕСО1 (в работе ПЧ ТМЕИС №3). Сравнение осциллограмм мгновенных значений линейного напряжения (рисунок 3.20 а, в) и гармонического состава напряжения (рисунок 3.20 б, г) показывает, что разработанная математическая модель является адекватной в плане воспроизведения частотной характеристики сети 10 кВ и режимов работы ПЧ ТМЕИС, что делает возможным ее использование при проведении дальнейших исследований по исключению резонанса и улучшению ЭМС за счет применения СПФ. Проведенное сравнение экспериментальных и расчетных K_U показало отклонение не более 5%.

Как видно из рисунков, разработанная имитационная модель обеспечивает приемлемую точность воспроизведения искажений гармонического состава распределительной сети на секциях ЗРУ-10 кВ.

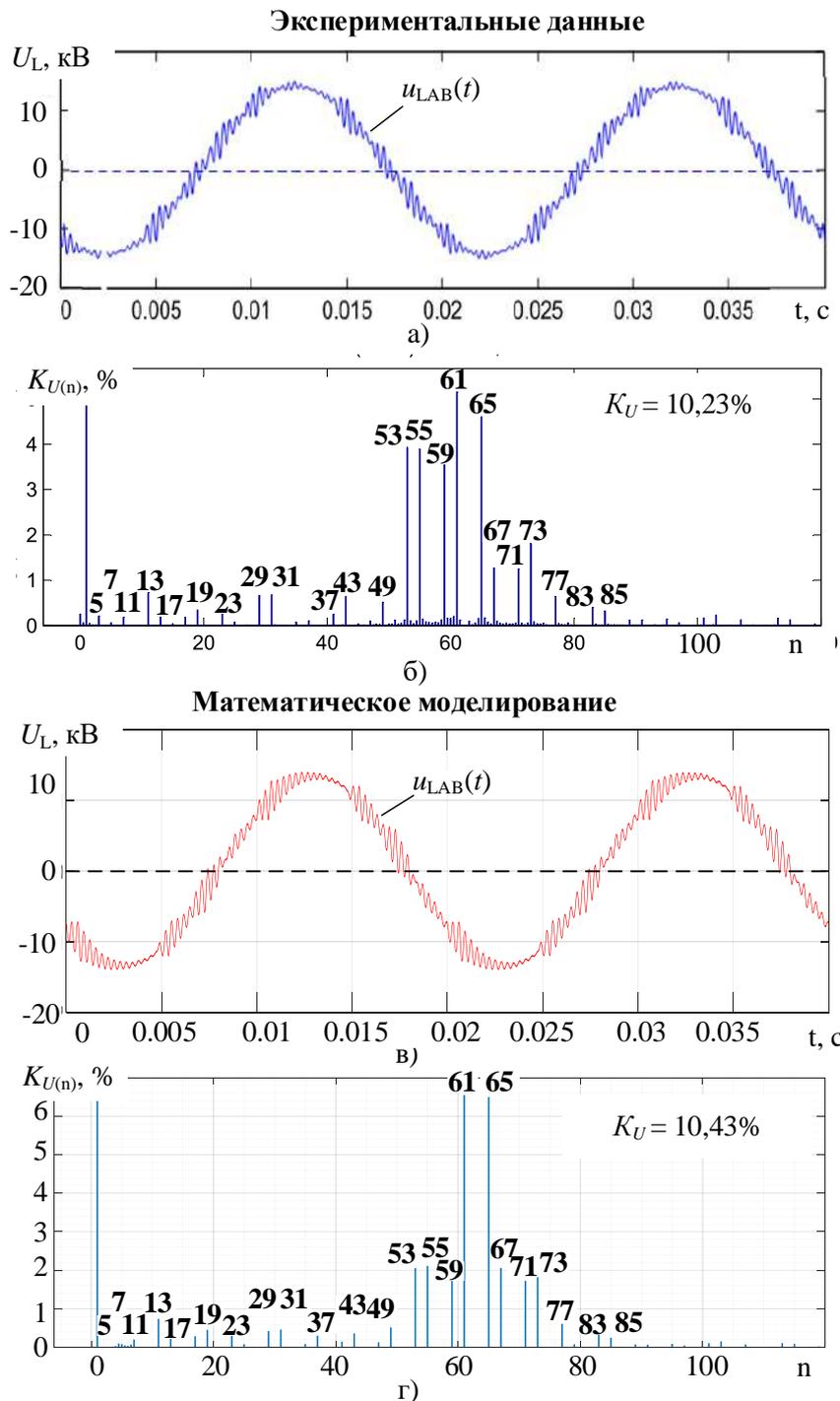


Рисунок 3.20 - Проверка адекватности разработанной имитационной модели с использованием осциллограмм мгновенных значений линейного напряжения и гармонического состава напряжения для результатов экспериментальных исследований (а, б) и данных, полученных в ходе моделирования на имитационной модели (в, г)

В дополнение, для подтверждения адекватности результатов имитационного моделирования выполнено сравнение имитационной и экспериментальной

частотных характеристик $Z_{mod}(f)$, $Z_{эксн}(f)$. Для наглядности результаты сведены на один график и приведены на рисунке 3.21. Воспроизведение экспериментальной частотной характеристики сети подробно описана во 2 главе диссертации. Получена путем деления значений амплитуд значимых гармоник напряжения на значимые гармоники тока с одинаковыми номерами. Амплитуды гармоник получены в результате анализа гармонического состава напряжений и токов, представленного в главе 2. Моделируемая частотная характеристика исследуемой распределительной сети получена при помощи функции **Impedance Measurement** (рисунок 3.3) программы Matlab.

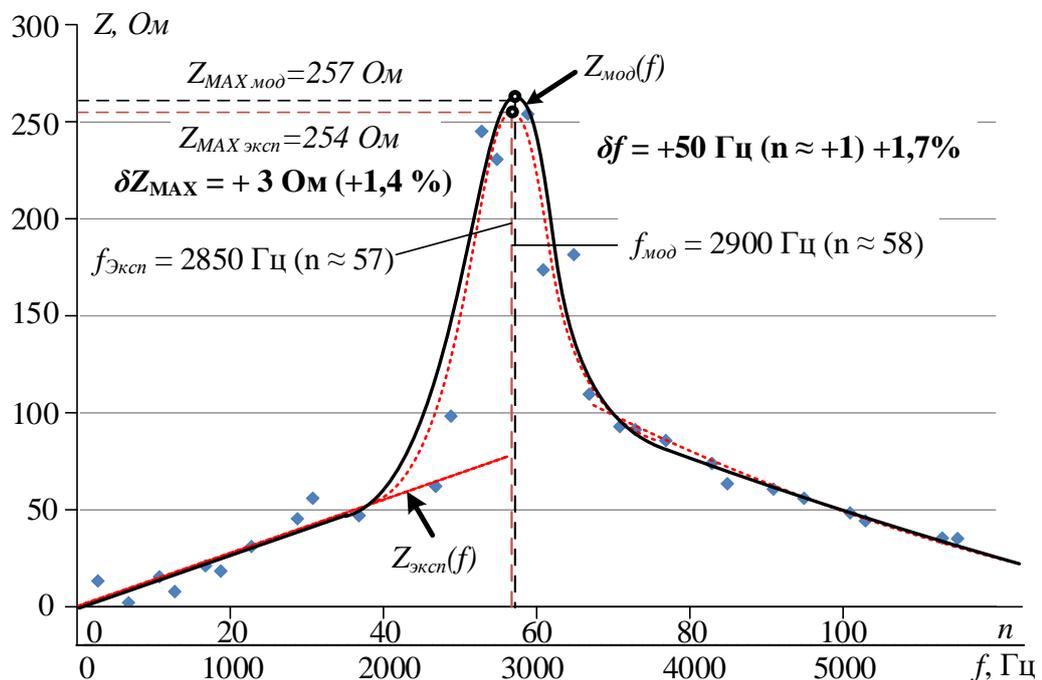


Рисунок 3.21 – Сравнение имитационной и экспериментальной частотных характеристик

Анализ рисунка 3.21 позволяет сказать, что имеет место приемлемое соответствие моделируемой (полученной на имитационной модели) и экспериментальной частотных характеристик. Расхождение результатов в виде максимального импеданса и экстремума частотной характеристики распределительной сети составляет менее 5%, что дает возможность использовать полученную имитационную модель для разработки мероприятий по исключению негативного влияния ПЧ-АВ ТМЕИС в составе мощных электроприводов скоростных проволочных блоков прокатного стана металлургического

предприятия АО «Металлургический завод Балаково» на качество напряжения сети распределительной сети.

3.5. Выводы по главе

1. Разработана комплексная имитационная модель системы электроснабжения завода АО «Металлургический завод Балаково» и мощных электроприводов скоростных проволочных блоков сортового стана, выполненных на базе ПЧ-АВ ТМЕИС. Модель позволяет проводить исследования влияния различных режимов электроснабжения завода и режимов работы электроприводов на базе ПЧ-АВ ТМЕИС на качество напряжения распределительной сети в различных точках подключения электроприемников.

2. В имитационной модели системы электроснабжения завода учтены параметры питающей сети 220 кВ и сетевых трансформаторов 220/10 кВ. Также были реализованы схемы ЗРУ-10 кВ и всех цеховых РП. Кроме этого, реализована эквивалентная модель ПЧ Siemens Sinamics S120 в виде группы источников тока, параметры которых задавались на основании гармонического анализа суммарного тока всех клетьевых блоков, полученного в ходе экспериментальных исследований во 2 главе. Для адекватного анализа частотных характеристик при моделировании кабельных линий были использованы П-образные схемы замещения с учетом активного сопротивления, индуктивности и сосредоточенных емкостей в начале и конце линии, так называемые «П-секции». Параметры П-секций задавались на основе известных удельных параметров R_0 , L_0 и C_0 , определенных из справочников и каталогов в соответствии с марками кабелей, а также согласно фактическим длинам кабелей и числу параллельных ниток.

3. Имитационная модель электроприводов скоростных проволочных блоков на базе ПЧ-АВ ТМЕИС1-3 реализована в виде управляемых источников напряжения, адекватно воспроизводящих гармонический состав токов, потребляемых преобразователями, полученных в ходе экспериментальных исследования на предприятии. В результате обработки экспериментальных осциллограмм были восстановлены углы переключения силовых транзисторов в составе активного выпрямителя. По этим углам рассчитана кривая линейного напряжения на входных

зажимах активного выпрямителя, получен ее гармонический состав. Установлено, что в спектре напряжения присутствуют гармоники в среднечастотной области с номерами 53, 55, 59, 61, 65, 67, 71, 73, 77, причем амплитуды этих гармоник достигают 6% основной гармоники.

4. Выполнена проверка адекватности имитационной модели путем сравнения результатов экспериментальных, полученных в ходе исследований на предприятии, и имитационных исследований. Произведено сравнение осциллограмм мгновенных значений линейного напряжения и гармонического состава напряжения, а также выполнено сравнение имитационной и экспериментальной частотных характеристик $Z_{mod}(f)$, $Z_{эксн}(f)$. Проведенное сравнение экспериментальных и моделируемых K_U показало отклонение не более 5%. Разработанная имитационная модель адекватно воспроизводит частотную характеристику сети 10 кВ и гармонический состав сетевого тока ПЧ-АВ ТМЕИС в различных режимах работы, что делает возможным ее использование при проведении дальнейших исследований по исключению резонанса и улучшению ЭМС за счет применения СПФ.

5. В последующих главах при использовании разработанной имитационной модели будет выполнено исследование эффективности применения СПФ для коррекции частотной характеристики сети 10кВ АО «Металлургический завод Балаково». Также имитационная модель будет использована в разрабатываемой методике расчета параметров СПФ при определении номинальной мощности фильтра и расчете значений емкостей и индуктивностей основных реактивных элементов СПФ – батарей конденсаторов и воздушных реакторов.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА НОВОГО СПОСОБА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ПЧ-АВ С ПИТАЮЩЕЙ СЕТЬЮ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ПАССИВНОГО ФИЛЬТРА

4.1. Разработка и применение СПФ для коррекции частотной характеристики распределительной сети 10 кВ металлургического завода АО «Металлургический завод Балаково»

Анализ, проведенный в главах 1, 2 показал, что применение традиционных типов ФКУ, настроенных на фильтрацию низких гармоник, а именно 5 и 7, является не эффективным с точки зрения воздействия на частотную характеристику и гармоники, расположенные в высокочастотном диапазоне. Применение же сложных двухчастотных широкополосных ФКУ сопряжено с определенными недостатками по сравнению с одночастотными фильтрами, а именно: высокая стоимость данного оборудования; большие габариты устройств, в связи с чем возникает определенная проблема с размещением оборудования на действующем металлургическом предприятии; фильтрация гармоник в широком диапазоне повлечет за собой серьезное увеличение мощности и сопряжено с сложностью настройки ФКУ [115-118].

В данной главе рассмотрен новый эффективный способ улучшения гармонического состава напряжения на секциях РУ-10 кВ за счет установки специализированных одночастотных пассивных фильтров, обеспечивающих коррекцию частотных характеристик сети 10 кВ со сдвигом наиболее значимого резонанса тока в низкочастотный диапазон.

Основными требованиями к разрабатываемому СПФ являются:

1. Способность к изменению формы частотной характеристики, в частности перемещению ее пика резонанса в необходимый безопасный диапазон частот, который находится между низкочастотной областью гармоник ($n=5, 7, 11, 13$), генерируемых как групповыми выпрямителями Siemens с технологией Smart, так и

ПЧ-АВ ТМЕИС, и высокочастотной областью гармоник ($n=51 \dots 78$), генерируемых мощными электроприводами с ПЧ-АВ ТМЕИС Toshiba-Mitsubishi.

2. Устройство должно иметь более простую силовую схему и обладать меньшей установленной мощностью и стоимостью при должной эффективности, чем комплекс из сложных групповых ФКУ, состоящий из параллельно подключенных различных типов классических фильтров гармоник или активных ФКУ.

3. Обеспечение надежной работы конденсаторов в составе данного устройства. Необходимо применение специализированных конденсаторных батарей в составе СПФ, способных функционировать при высоких значениях суммарного коэффициента гармонических составляющих тока K_I вплоть до 45% на конденсаторных батареях без перегрева и риска выхода из строя. Выполнение этого условия делает возможным его использование в качестве корректора частотной характеристики сети.

Принципиальная схема СПФ приведена на рисунке 4.1

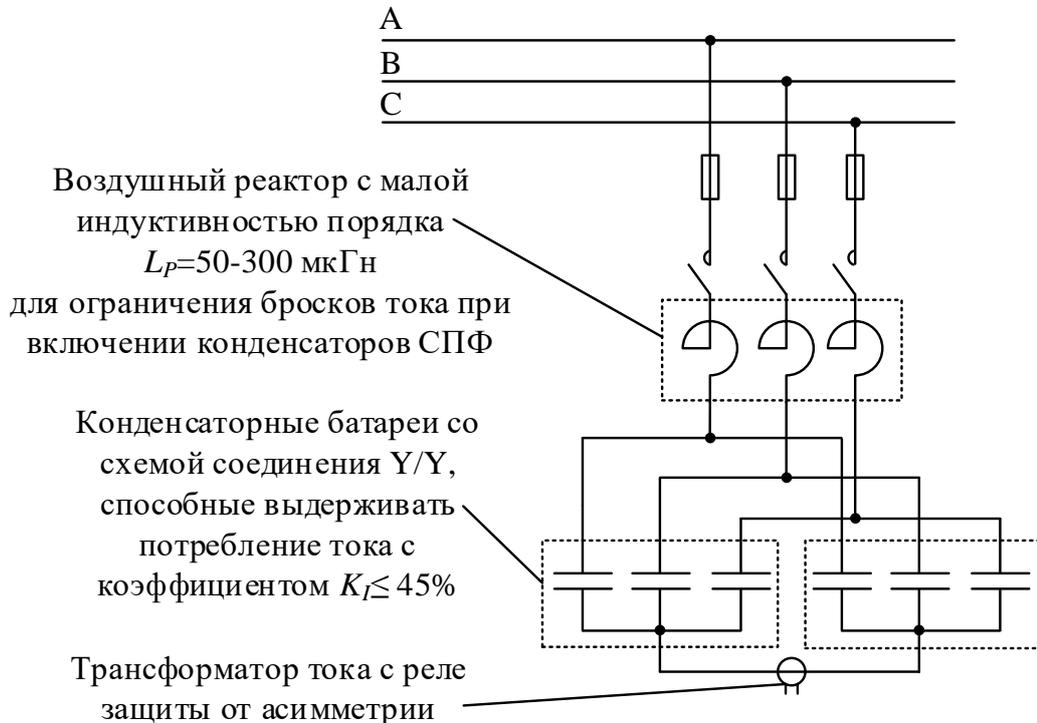


Рисунок 4.1 – Принципиальная электрическая схема СПФ

За основу был взят одночастотный фильтр как наиболее дешевое и простое в исполнении устройство, относительно сложных широкополосных или

двухчастотных ФКУ, а также активных ФКУ. Также еще одним преимуществом будет являться габарит устройства, что особенно важно для реализации данного фильтра на действующем предприятии, при установке его на территории распределительного устройства скомпонованного проектировщиками.

Конструктив СПФ состоит из основных элементов:

1. Конденсаторных батарей, способных к перегрузке по коэффициенту гармонического составляющего тока K_I , с группой соединения в две звезды и подключённым трансформатором тока с реле защиты от асимметрии. Это однополярное реле остаточного тока, нечувствительное к гармоникам с независимой выдержкой времени (рисунок 4.3). Такая группа соединения конденсаторов является оптимальным, простым и эффективным решением в целях гарантии надлежащего мониторинга батареи конденсаторов. Каждый емкостный элемент состоит из двух тонких алюминиевых листов, которые составляют корпуса, изолированные между собой посредством пленочного диэлектрика, представляющего собой несколько слоев полипропилена с шероховатой поверхностью. Последний идеально подходит для оптимальной пропитки биоразлагаемым маслом, которое является нетоксичным. Емкостные элементы помещены в контейнер из штампованной и сварочной нержавеющей стали, охарактеризованный высокой прочностью и выдерживающий воздействие механического напряжения, возникающего в случае поломки. Данное исполнение конденсаторных батарей позволяет выдерживать коэффициент гармонического составляющего тока протекающих через них вплоть до $K_I \leq 45\%$ и использовать их для коррекции частотной характеристики. Внешний вид конденсаторных батарей, используемых в СПФ приведен на рисунке 4.2

2. Воздушный реактор с малой величиной индуктивности L_P , последовательно соединенный с конденсаторными батареями, необходимый для ограничения бросков пусковых токов при включении конденсаторных батарей СПФ. По факту это однофазовые реакторы с воздушным сердечником и медной обмоткой, которые устанавливаются последовательно на батарею конденсаторов. Они могут быть спроектированы как для установки в закрытом помещении, так и для установки на

открытом воздухе. Реакторы должны устанавливаться на опорных изоляторах с классом изоляции, равным или выше класса изоляции батареи конденсаторов в соответствии с требованиями по минимальному расстоянию при установке (рисунок 4.4). Внешний вид реактора приведен на рисунке 4.5.

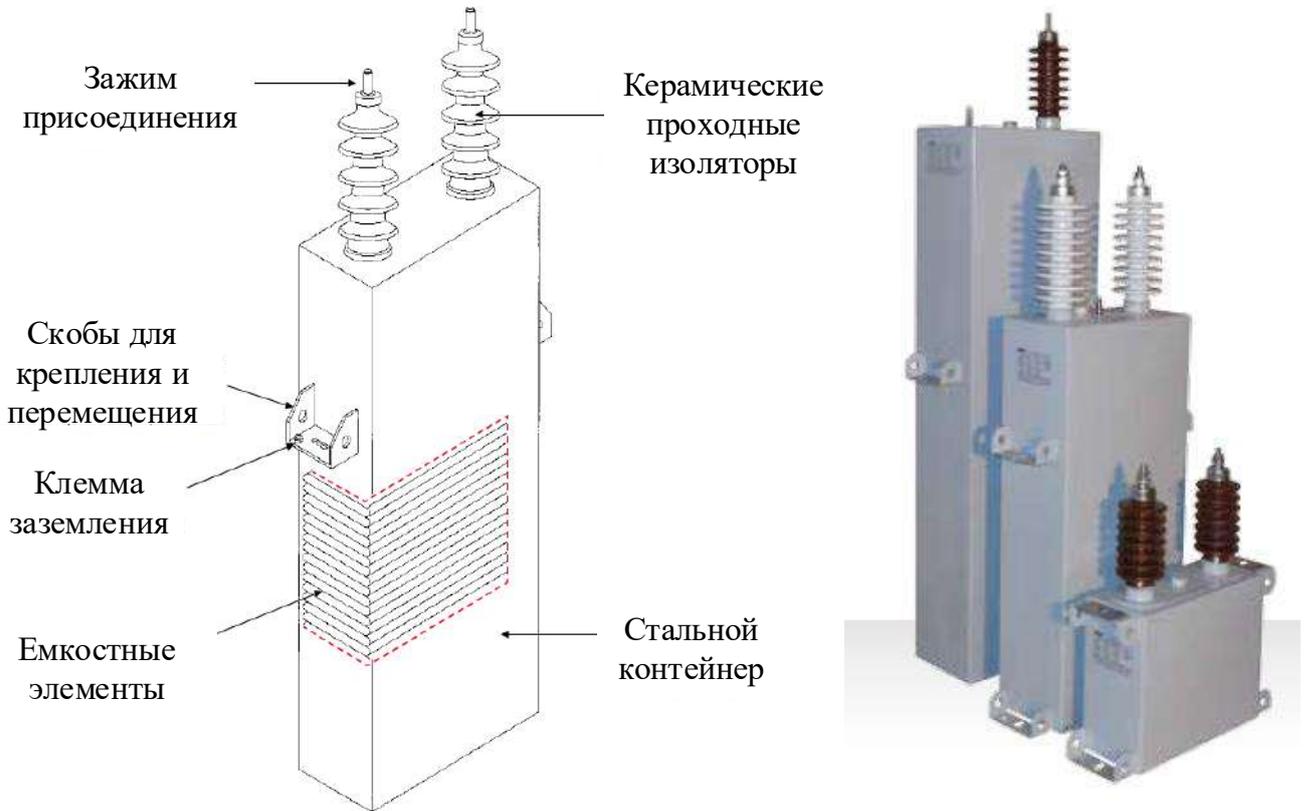


Рисунок 4.2 – Внешний вид с внутренним сечением конденсатора

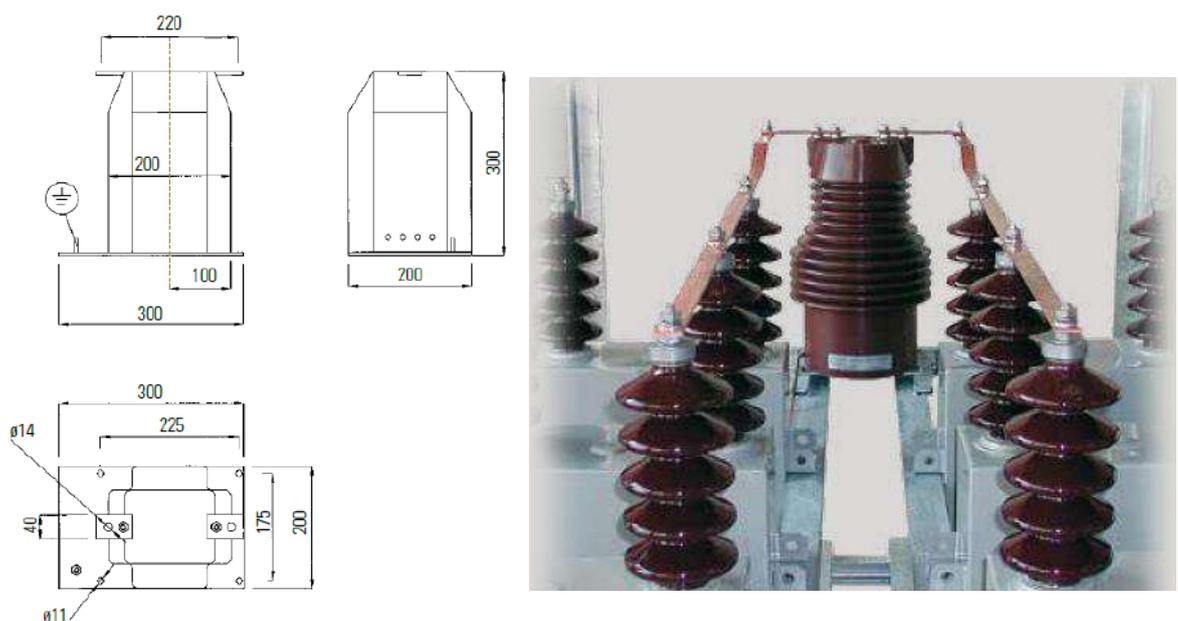
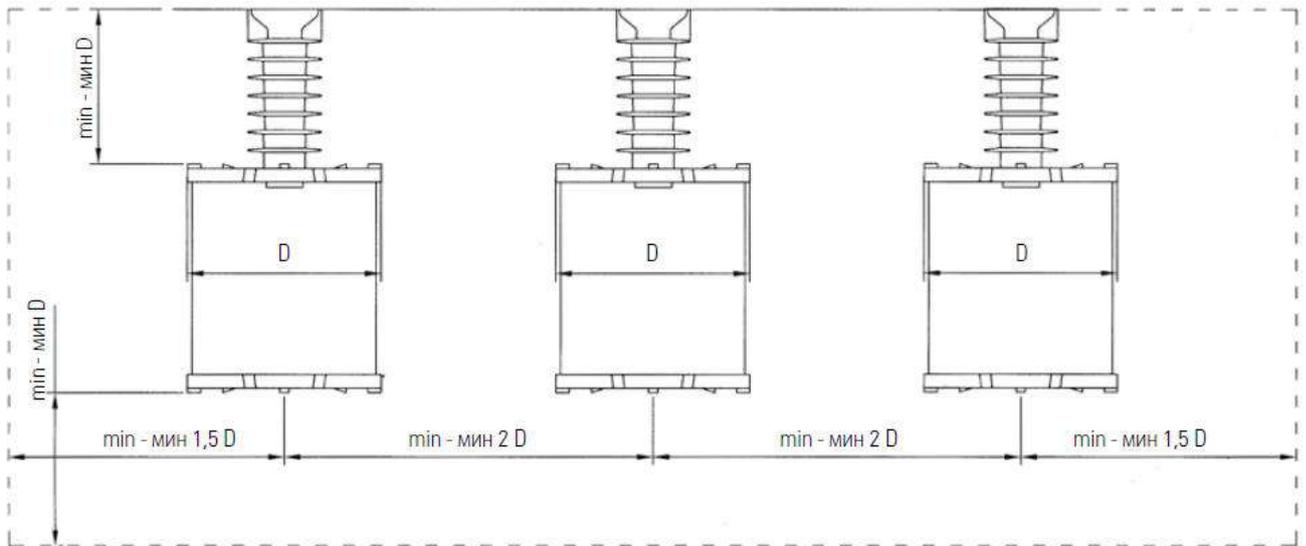
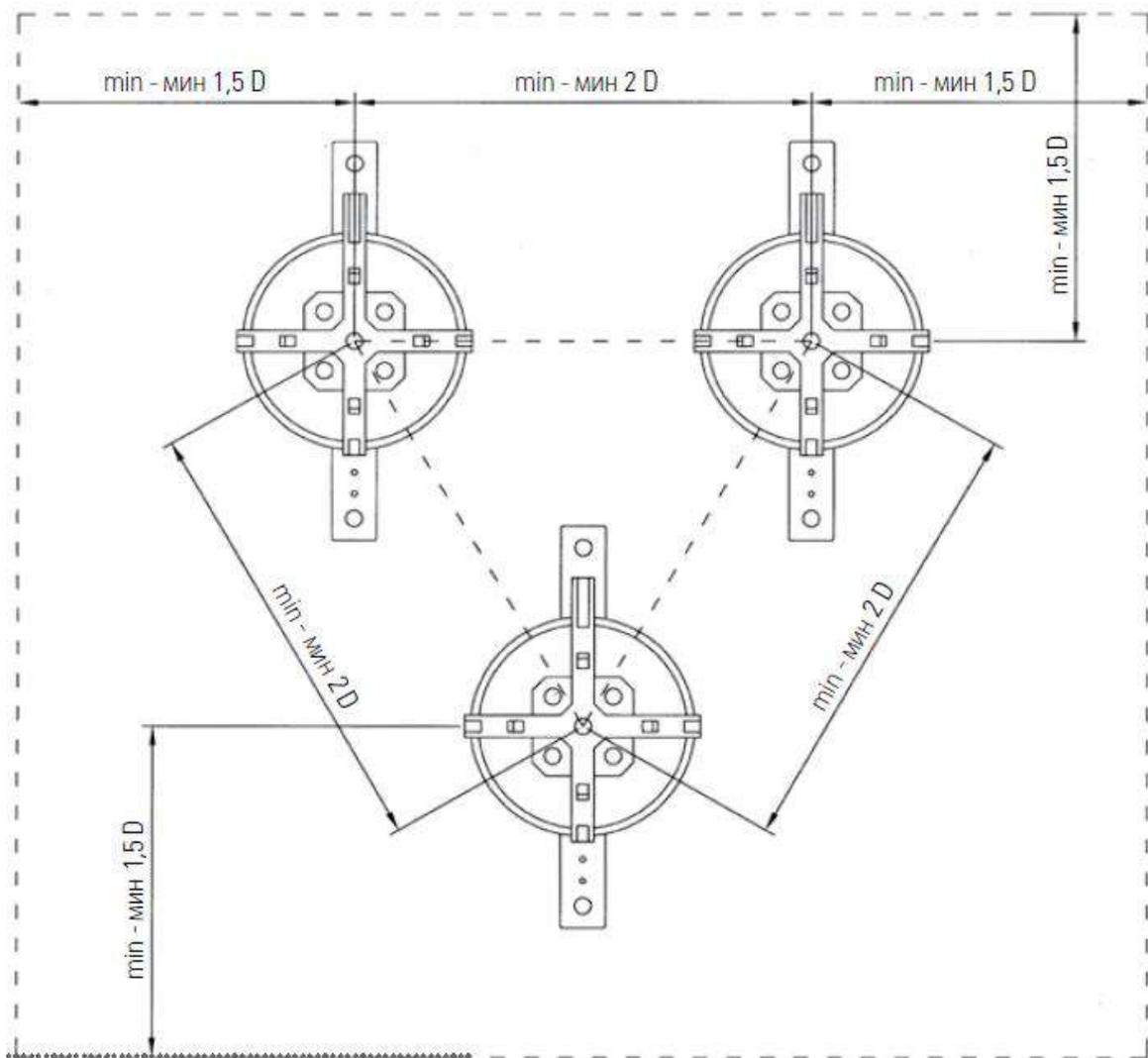


Рисунок 4.3 – Внешний вид трансформатора тока с реле защиты от асимметрии



а)



б)

Рисунок 4.4 – Пример установки реакторов: линейная установка (а), установка в виде треугольника (б)



Рисунок 4.5 – Внешний вид реактора для установки в закрытом помещении и на открытом воздухе

Подобрав основные конструктивные элементы из которых состоит СПФ, далее необходимо выполнить настройку фильтра и расчет основных параметров сопротивления R и индуктивности реактора L , емкости конденсаторных батарей C , добротности q , общей реактивной мощности Q_C фильтра.

Идея применения СПФ заключается не в фильтрации конкретной гармоники, как это обычно происходит при традиционной настройке и использовании ФКУ, а в выборе параметров по новой разработанной методике. Она позволяет настраивать одночастотный фильтр, рассмотренный выше, таким образом, чтобы повлиять на экстремум частотной характеристики сети. За счет этого экстремум уменьшается и перемещается между высокочастотной зоной диапазона генерирования гармоник ПЧ-АВ ТМЕИС и зоной низкочастотной, где присутствуют стандартные гармоники 5, 7, 11, 13 порядка, генерируемые остальными ПЧ клетей прокатного стана. Это позволяет исключить резонанс частоты в распределительной сети с целью улучшения ЭМС. Методика выбора параметров СПФ рассмотрена далее.

4.2. Разработка методики расчета параметров СПФ

Определение основных параметров СПФ проводилось по разработанной методике, с использованием проверенной на адекватность в 3 главе имитационной модели металлургического комплекса АО «Металлургический завод Балаково», где реализована распределительная сеть среднего напряжения и модели электроприводов на базе ПЧ-АВ. В соответствии с методикой необходимо выбрать место установки СПФ. Как правило, это общие секции ГПП-10 кВ. Далее необходимо произвести моделирование с подключенным СПФ, где задается различная мощность данного устройства с различной индуктивностью и емкостью, а также частотой настройки. По полученным результатам производится выбор оптимальных параметров СПФ, при которых достигается минимальное значение коэффициента суммарных гармонических искажений напряжений K_U . Далее для выбранной конфигурации необходимо определить величину тока, протекающего через конденсаторы, и коэффициент искажения по току K_I . На последнем этапе проводится оценка величины броска тока и перенапряжения при включении СПФ с заданными параметрами [115]. Необходимо рассмотреть подробнее каждый этап.

4.2.1. Определение места установки СПФ во внутризаводской СЭС

На основании разработанной имитационной модели необходимо выбрать место установки СПФ. Определены две возможные точки подключения СПФ 1500 кВАр: 1) на секциях РУ-10 кВ РП-5 «Газоочистка»; 2) на секциях РУ-10 кВ РП-4 МЕСО1. В первом случае величина индуктивности воздушных реакторов может составлять $L_{P1} = 50-100$ мкГн, во втором – $L_{P2} = 250-300$ мкГн. Необходимо отметить, что после предварительного выбора места установки СПФ на предприятии данный шаг необходимо согласовать со службой эксплуатации завода. В связи с тем, что на РП-4 МЕСО1 не было резервного места и возможности подключения данных СПФ, а в РП-5 «Газоочистка» имелась такая возможность, эксплуатацией было согласовано именно это место установки. Таким образом, подключение СПФ производится в распределительном устройстве РП-5 «Газоочистка» РУ-10 кВ. На рисунке 4.6 представлен упрощенный фрагмент схемы электроснабжения с подключенным СПФ. Красным цветом обозначена линия,

показывающая путь подключения СПФ в РП-5 до источника высших гармоник мощных электроприводов скоростных проволочных блоков с ПЧ-АВ ТМЕИС. Жирная линия показывает, какие кабельные линии задействованы. Их индуктивности $L_{кл1}$, $L_{кл2}$ необходимо учитывать при расчете суммарной эквивалентной индуктивности L_{Σ} между конденсаторами СПФ и секциями ЗРУ-10 кВ [116-124]. Характеристики кабельных линий металлургического предприятия приведены в приложении А на основании кабельного журнала, полученного от специалистов завода.

Также стоит отметить, что сечения кабелей для подключения СПФ необходимо выбрать с учетом превышения значения длительно допустимого тока $I_{длт.доп.}$ в 1,3-1,7 раза максимально возможных действующих значений токов СПФ с учетом высших гармоник при $K_{I,max} = 45\%$.

Фрагмент имитационной модели системы электроснабжения электроприемников 10 кВ АО «Металлургический завод Балаково», имитирующий работу активного выпрямителя и СПФ, установленный в распределительном устройстве РП-5 «Газоочистка», показан на рисунке 4.7. Имитационная модель РП-5 «Газоочистка», разработанная в программе Matlab с подключенными СПФ представлена на рисунке 4.8. Сам блок СПФ представлен блоком Series RLC Branch. Его можно использовать в качестве одночастотного фильтра. В данном блоке можно изменять базовые параметра ФКУ такие как: ёмкость конденсаторной батареи C , индуктивность реактора L , сопротивление реактора R . Частота настройки фильтра n , добротность Q и суммарная реактивная мощность фильтра Q_C рассчитываются автоматически на основании базовых заданных параметров. Таким образом, изменяя сопротивление R и индуктивность L реактора, емкость конденсаторной батареи C , изменяются общая настройка и параметры СПФ. Данный элемент имитационной модели позволяет в полной мере производить исследования на предмет улучшения ЭМС мощных ПЧ-АВ ТМЕИС, генерирующих высокочастотные и низкочастотные гармоники, с питающей распределительной сетью с целью коррекции экстремума частотной характеристики за счет применение рассматриваемых СПФ [116, 125].

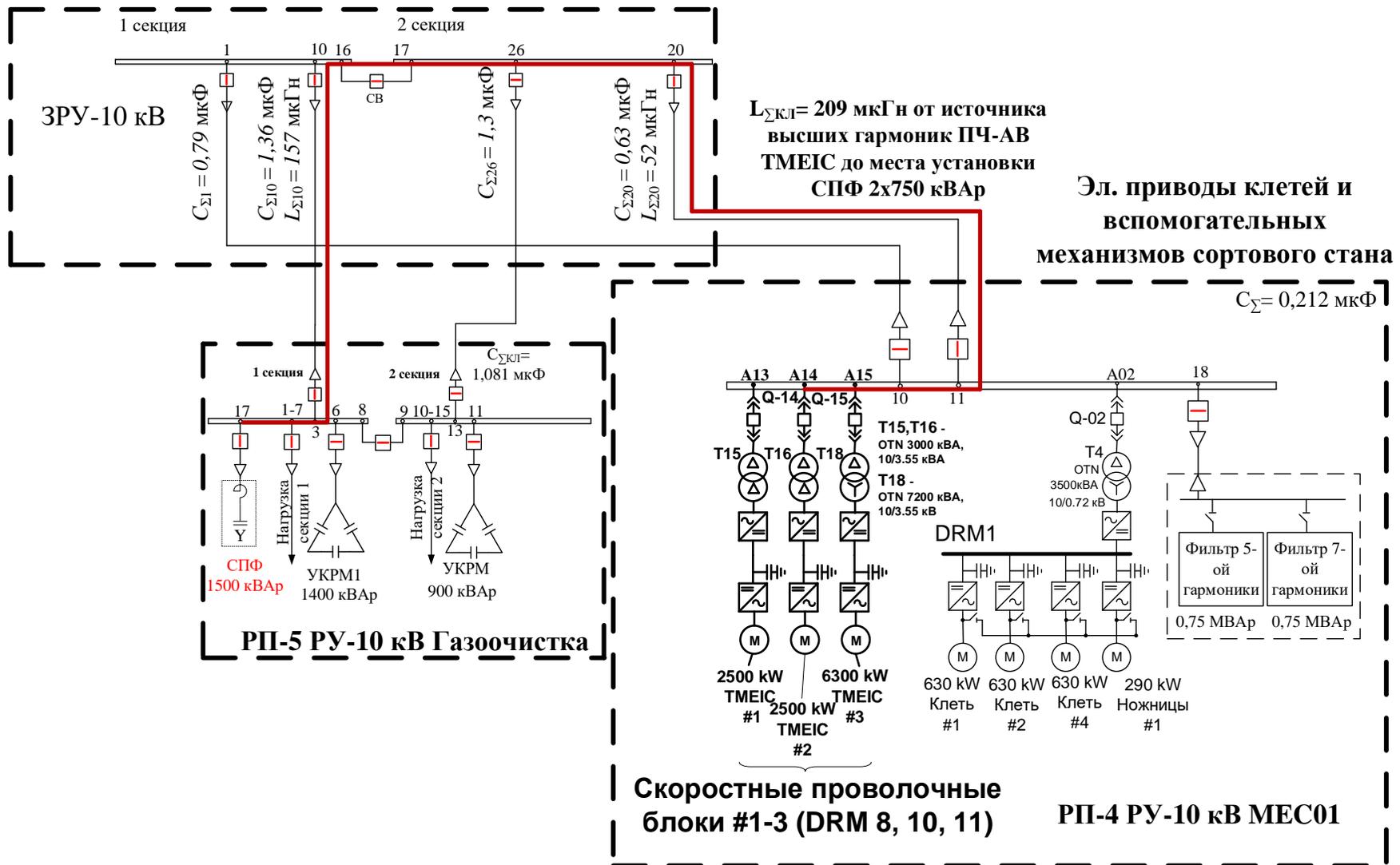


Рисунок 4.6 – Участок схемы электроснабжения АО «Металлургический завод Балаково» с возможным местом установки СПФ

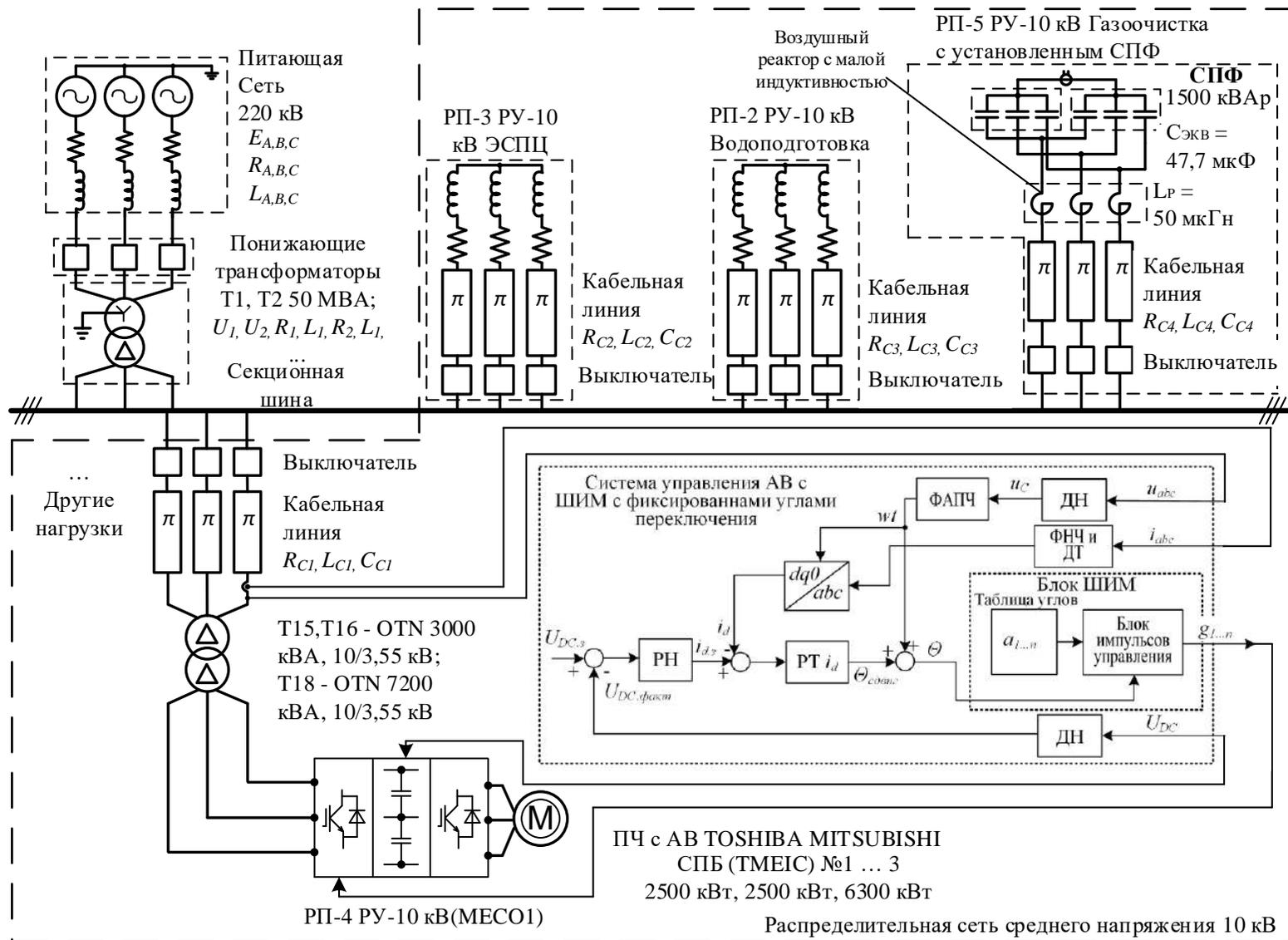


Рисунок 4.7 - Фрагмент имитационной модели системы электроснабжения электроприемников 10 кВ АО «Металлургический завод Балаково», имитирующий работу активного выпрямителя и СПФ.

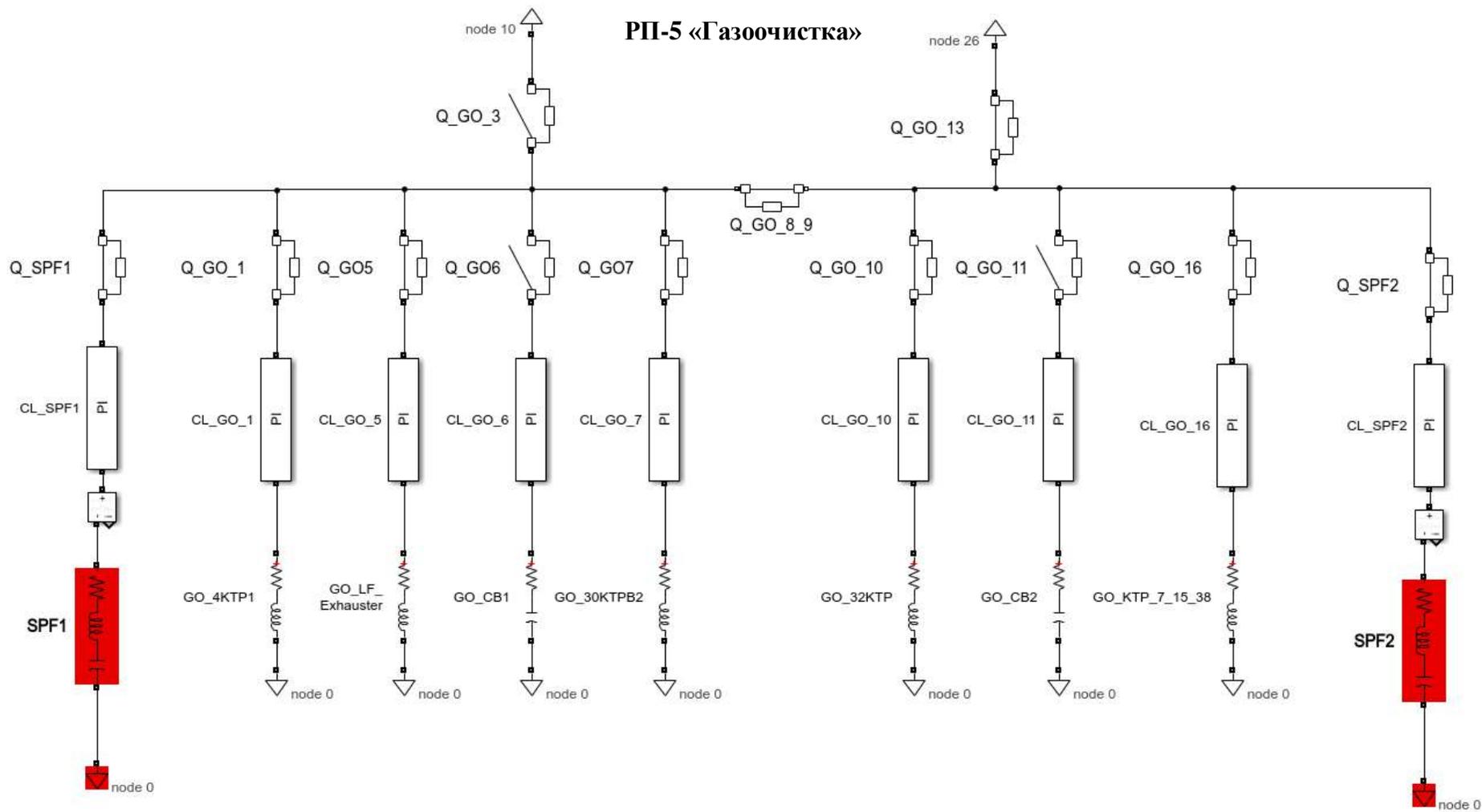


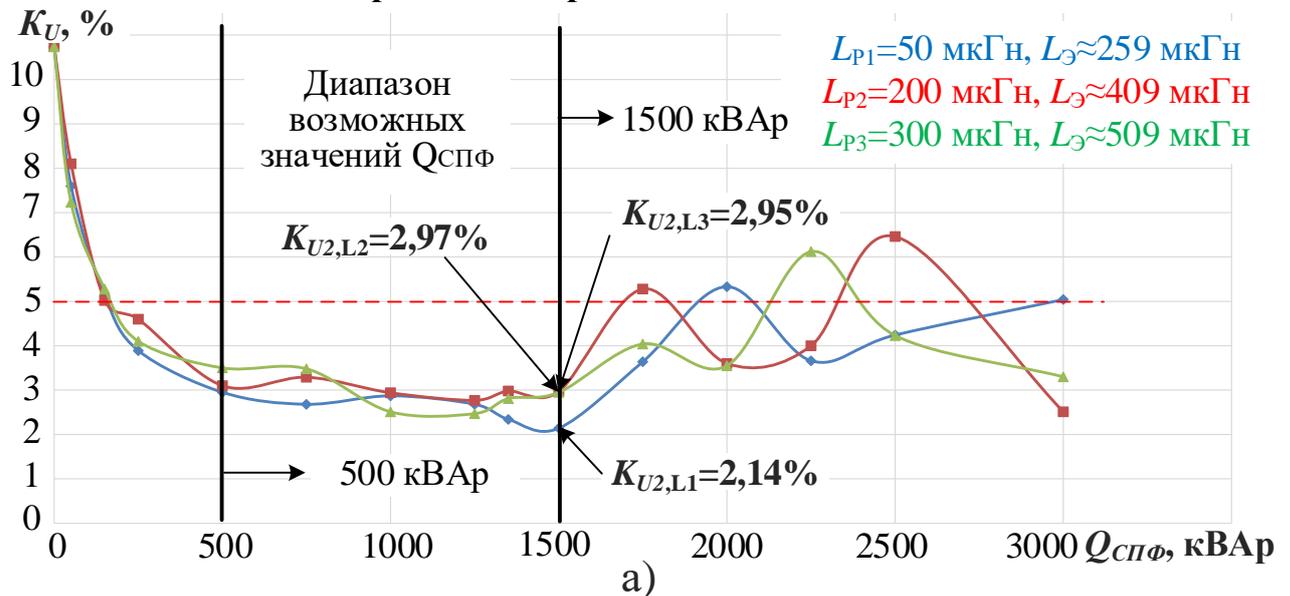
Рисунок 4.8 - Имитационная модель РП-5 «Газоочистка» с установленными СПФ

4.2.2. Определение номинальной мощности, эквивалентной емкости конденсаторов и индуктивности воздушного реактора СПФ

Далее производится имитационное моделирование для двух основных возможных режимов схем электроснабжения завода: для раздельной работы секций (данная схема используется с 2016 года и актуальна сейчас) и совместной работы секций ЗРУ-10 кВ (данный режим использовался до 2016 года), с различными параметрами СПФ, подключенных в РП-5, где задается различная мощность данного устройства с различной индуктивностью и емкостью, а также частотой настройки. Главным критерием проверки является достижение минимального значения коэффициента суммарных гармонических искажений напряжений K_U с учетом оптимальных параметров СПФ. Измерения производились на 2 секции ЗРУ-10 кВ [116, 125].

Результаты имитационного моделирования занесены в таблицу 4.1. Построены графики зависимости коэффициента нелинейного искажения напряжения K_U в зависимости от мощности СПФ и приведены на рисунке 4.9. Результаты показали, что для достижения наилучшего технического эффекта по улучшению гармонического состава напряжения со снижением исходных значений K_U на секциях 1 и 2 ЗРУ-10 кВ ГПП более чем на 70 % (до $K_U = 2,05-2,68\%$) оптимальное значение номинальной мощности СПФ должно составлять от 500 до 1500 кВАр как при раздельной, так при совместной работе секций 1 и 2. При этом величина суммарной эквивалентной индуктивности между конденсаторами СПФ и секциями ЗРУ-10 кВ ГПП должна составлять примерно $L_{\Sigma} = 259$ мкГн (рисунок 4.9). В соответствии с этим величина индуктивности воздушного реактора СПФ может быть определена как разница между граничной индуктивностью L_{Σ} и суммарной индуктивностью КЛ 10 кВ от источника высших гармоник ПЧ-АВ, расположенных в РП-4 МЕСО1 до точки подключения СПФ. Суммарная индуктивность кабельных линий при установке СПФ в РП-5 составляет $L_{кл1} \approx 157$ мкГн, в РП-4 $L_{кл2} \approx 52$ мкГн [116, 125]. Данные посчитаны на основании кабельного журнала, предоставленного персоналом АО «Металлургический завод Балаково». Кабельный журнал представлен в приложении А.

Зависимость коэффициента нелинейных искажений напряжений на секции 2 ЗРУ-10 кВ ГПП от мощности СПФ при разных индуктивностях реактора в составе компенсатора (установка СПФ в РП-5 "Газоочистка") при раздельной работе секций 1 и 2



Зависимость коэффициента нелинейных искажений напряжений на секции 2 ЗРУ-10 кВ ГПП от мощности СПФ при разных индуктивностях реактора в составе компенсатора (установка СПФ в РП-5 "Газоочистка") при совместной работе секций 1 и 2

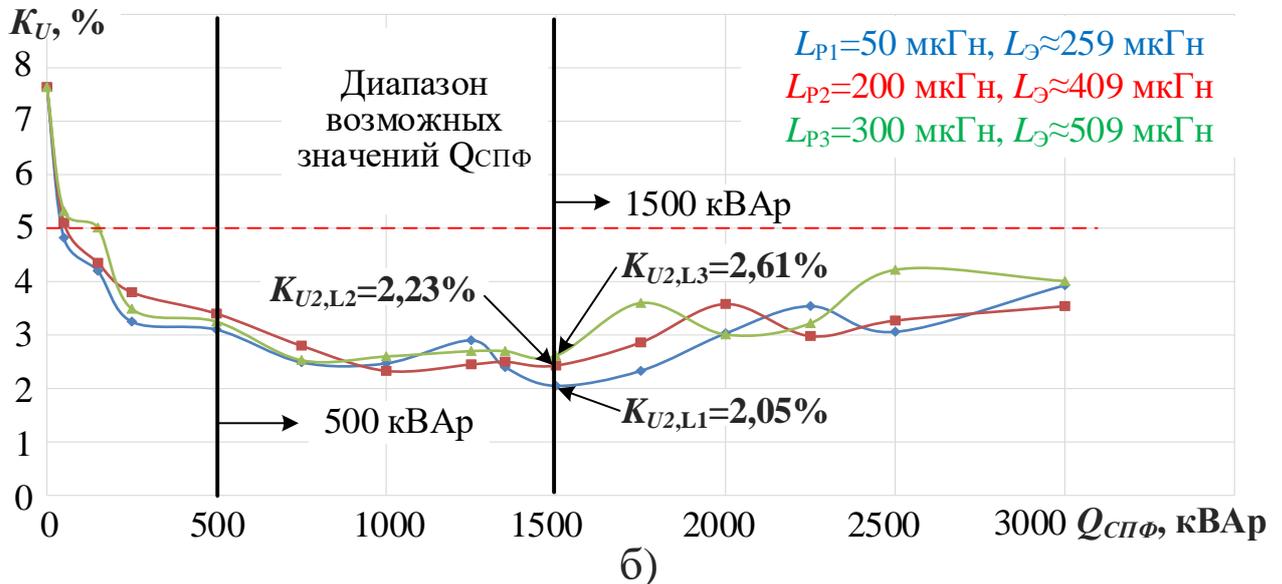


Рисунок 4.9 - Сравнение коэффициентов нелинейных искажений напряжения на секции 2 ЗРУ-10 кВ ГПП в зависимости от мощности СПФ при разных индуктивностях реактора в составе компенсатора (установка СПФ в РП-5 "Газоочистка") при раздельной работе секций 1 и 2 (а), при совместной работе секций 1 и 2 (б)

Таблица 4.1 – Зависимость коэффициента нелинейного искажения напряжения K_U на секциях ЗРУ-10 кВ при различной мощности и индуктивности СПФ

Раздельная работа секций 1 и 2						Совместная работа секций 1 и 2					
$L_P=50$ мкГн		$L_P=200$ мкГн		$L_P=300$ мкГн		$L_P=50$ мкГн		$L_P=200$ мкГн		$L_P=300$ мкГн	
$K_U, \%$	$Q_{СПФ},$ кВАр	$K_U, \%$	$Q_{СПФ},$ кВАр	$K_U, \%$	$Q_{СПФ},$ кВАр	$K_U, \%$	$Q_{СПФ},$ кВАр	$K_U, \%$	$Q_{СПФ},$ кВАр	$K_U, \%$	$Q_{СПФ},$ кВАр
10,74	0	10,74	0	10,74	0	7,64	0	7,64	0	7,64	0
7,6	50	8,1	50	7,23	50	4,82	50	5,1	50	5,32	50
5,13	150	5,02	150	5,28	150	4,2	150	4,35	150	5,01	150
3,89	250	4,6	250	4,1	250	3,25	250	3,8	250	3,49	250
2,95	500	3,1	500	3,5	500	3,1	500	3,4	500	3,25	500
2,68	750	3,29	750	3,48	750	2,49	750	2,8	750	2,53	750
2,87	1000	2,94	1000	2,51	1000	2,47	1000	2,33	1000	2,6	1000
2,68	1250	2,77	1250	2,47	1250	2,9	1250	2,45	1250	2,7	1250
2,34	1350	2,98	1350	2,81	1350	2,4	1350	2,5	1350	2,64	1350
2,14	1500	2,97	1500	2,95	1500	2,05	1500	2,43	1500	2,61	1500
3,64	1750	5,28	1750	4,04	1750	2,33	1750	2,86	1750	3,6	1750
5,33	2000	3,6	2000	3,55	2000	3,03	2000	3,58	2000	3,01	2000
3,66	2250	4	2250	6,12	2250	3,54	2250	2,98	2250	3,22	2250
4,24	2500	6,46	2500	4,23	2500	3,06	2500	3,27	2500	4,22	2500
5,04	3000	2,51	3000	3,3	3000	3,93	3000	3,54	3000	4,01	3000

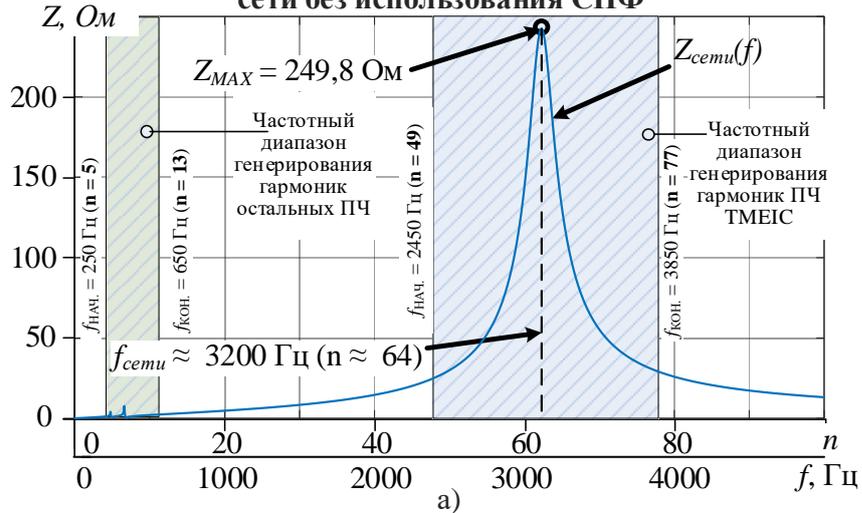
В абсолютном выражении диапазон значений коэффициента искажения напряжения K_U без использования СПФ составляет: при раздельной работе секций $K_U = 10,26\%$; при совместной работе секций $K_U = 7,64\%$. Данные значения превышают установленные показатели в 5% по ГОСТ 32144-2013 и являются неприемлемыми с расчетом до 150 гармоники [14, 116, 125].

После установки СПФ в имитационной модели в распределительном устройстве РП-5 «Газоочистка» и проведения моделирования, для разных режимов схемы электроснабжения, а именно раздельная и совместная работа секций, показатели коэффициента искажения напряжения при раздельной работе секций K_U

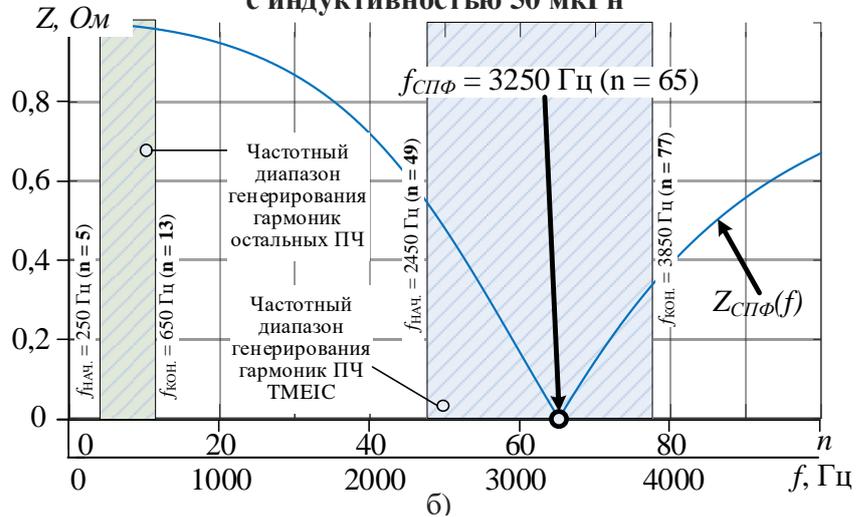
= 2,14% (для СПФ мощностью 1500 кВАр, $L_P = 50$ мкГн) и $K_U = 2,68\%$ (для одного СПФ мощностью 750 кВАр, $L_P = 50$ мкГн); СПФ при совместной работе секций $K_U = 2,05\%$ (для СПФ мощностью 1500 кВАр, $L_P = 50$ мкГн) и $K_U = 2,49\%$ (для одного СПФ мощностью 750 кВАр, $L_P = 50$ мкГн). Анализируя данные, полученные в ходе моделирования, приведенные в таблице 4.1 и на рисунке 4.9, можно сделать предварительный вывод, что наилучший технический эффект достигается при СПФ мощностью 1500 кВАр, $L_P = 50$ мкГн, поскольку суммарный коэффициент искажения напряжения K_U имеет минимальное значение. Данное изменение суммарного коэффициента искажения напряжения K_U является существенным техническим эффектом по улучшению качества напряжения на секциях ЗРУ-10 кВ ГПП, являющихся точками общего присоединения электроприемников предприятия [116, 125].

Еще одним важным параметром, который позволяет использовать данный СПФ в качестве корректора частотной характеристики, является собственная частота настройки фильтра. Здесь подразумевается иной подход, нежели в настройке традиционных ФКУ. Настройка традиционных одночастотных, двухчастотных или широкополосных ФКУ осуществляется на конкретную гармонику или диапазон гармоник, которые необходимо отфильтровать. Для СПФ, который по своей структуре исполнения является одночастотным фильтром с определенными параметрами, собственная частота резонанса фильтра, т.е. частота на которую настроен фильтр, должна совпадать по своему значению с частотой экстремума частотной характеристики сети, а не на фильтрацию какой-либо гармоники, по сравнению с традиционными ФКУ. В нашем случае, для наиболее оптимальной конфигурации из СПФ мощностью $Q_C = 1500$ кВАр и индуктивностью реактора $L_P = 50$ мкГн, частота настройки фильтра соответствует 65 гармонике или 3250 Гц и практически точно совпадает с частотой резонанса частотной характеристики без использования СПФ (вершина пика располагается на частоте 3200 Гц или 64 гармонике). Это подтверждает рисунок 4.10, выполненный при помощи имитационной модели СЭС завода АО «Металлургический завод Балаково».

Исходная частотная характеристика распределительной сети без использования СПФ



Частотная характеристика СПФ мощностью 1500 кВАр с индуктивностью 50 мкГн



Частотная характеристика распределительной сети с использованием СПФ 1500 кВАр и индуктивностью 50 мкГн

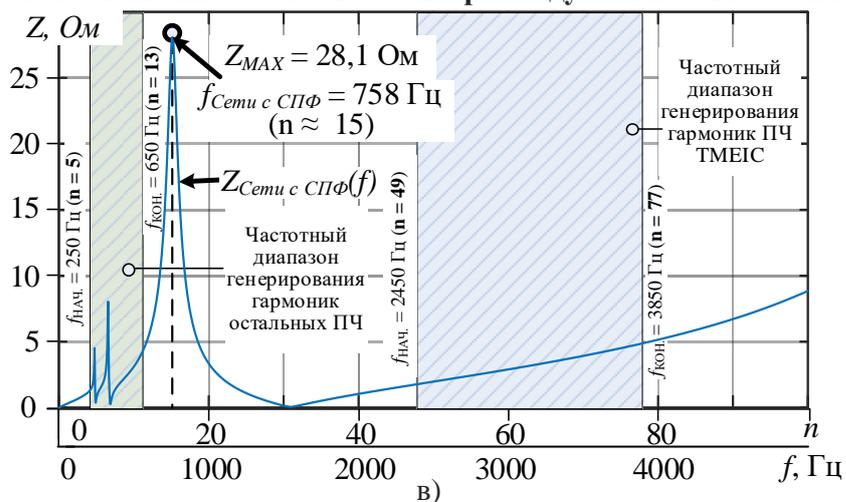


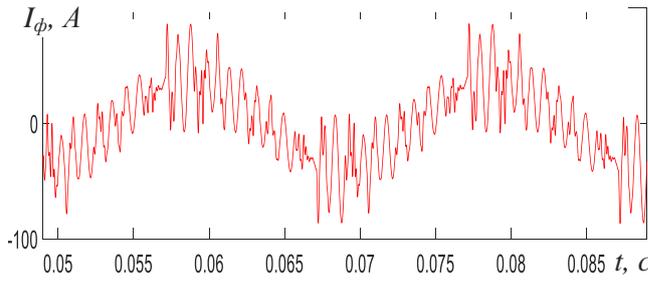
Рисунок 4.10 – Анализ частотной характеристики сети: (а) исходная частотная характеристика без использования СПФ; (б) частотная характеристика СПФ 1500 кВАр $L_p = 50 \text{ мкГн}$; (в) частотная характеристика с использованием СПФ 1500 кВАр $L_p = 50 \text{ мкГн}$

Использование такого СПФ с заданными параметрами и частотой настройки позволяет успешно использовать его в качестве корректора частотной характеристики, что подтверждает рисунок 4.10, в. Как можно видеть, после подключения СПФ в РП-5 «Газоочистка» резонансный пик тока (максимальные значения полных сопротивлений на частоте резонанса) с 64 гармоники сместился влево в зону 15 гармоники. Также немаловажным является уменьшение максимальной величины резонансного пика характеристика тока по сравнению с исходной частотной характеристикой сети. Если в исходной характеристике без использования СПФ $Z_{MAX}=249,8$ Ом, то при использовании СПФ $Z_{MAX}=28,1$ Ом.

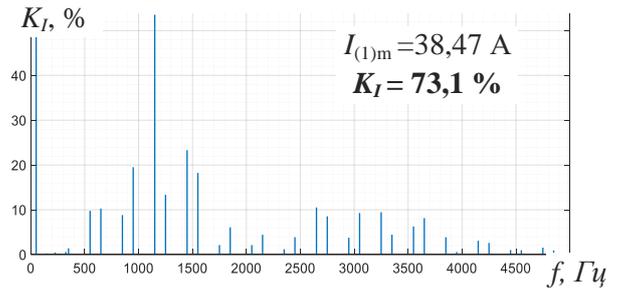
4.2.3. Анализ суммарного коэффициента гармонических искажений тока конденсаторных батарей в СПФ

После того как были определены основные параметры СПФ в виде мощности и емкости конденсаторных батарей, индуктивности реактора, частоты настройки фильтра, при которых достигается минимальное значение коэффициента искажения напряжения K_U , следующим шагом для выбранной конфигурации основных параметров СПФ, на имитационной модели сети 10 кВ района ГПП необходимо определить величину тока, протекающего через конденсаторы, и коэффициент искажения по току K_I . Данный параметр очень важен для стабильной работы конденсаторных батарей. В ходе проведенных исследований была доказана возможность применения специализированных конденсаторных батарей в составе СПФ, способных функционировать при высоких значениях суммарного коэффициента гармонических составляющих тока K_I (вплоть до 45 %) без перегрева и риска выхода из строя (температура конденсаторов составляла 27 °С в летний период времени в помещении с естественной вентиляцией). Превышение данного параметра повысит температуру конденсаторных батарей в составе СПФ и может привести к выходу из строя данного фильтра [116, 123, 125, 126]. Результаты исследования представлены на рисунках 4.11, 4.12, 4.13. Конструктивное строение конденсаторной батареи, способной выдерживать перегрузку по коэффициенту гармонических составляющих тока K_I до 45%, подробно описано в параграфе 4.1.

Мгновенные значения фазного тока СПФ 500 кВАр на секциях РП-5, при раздельной работе секций ГПП

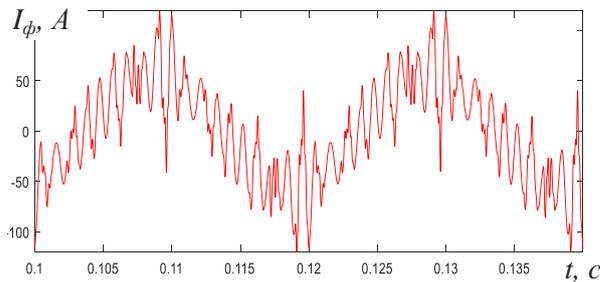


Гармонический состав фазного тока СПФ 500 кВАр на секциях РП-5, при раздельной работе секций ГПП

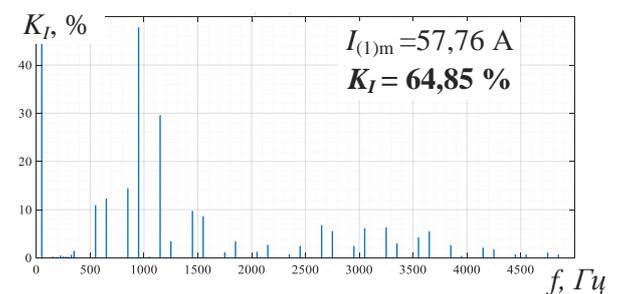


а)

Мгновенные значения фазного тока СПФ 750 кВАр на секциях РП-5, при раздельной работе секций ГПП

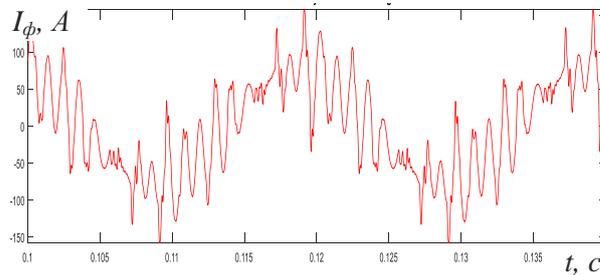


Гармонический состав фазного тока СПФ 750 кВАр на секциях РП-5, при раздельной работе секций ГПП

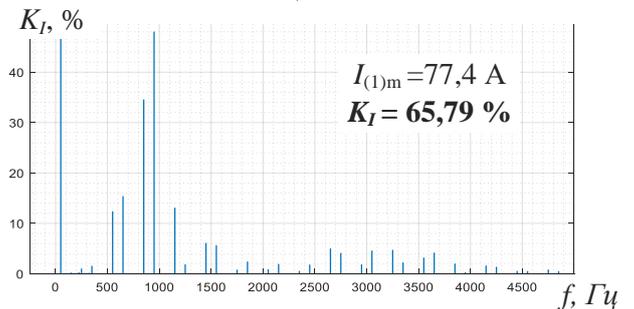


б)

Мгновенные значения фазного тока СПФ 1000 кВАр на секциях РП-5, при раздельной работе секций ГПП

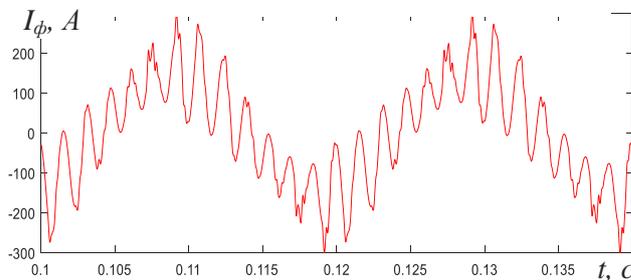


Гармонический состав фазного тока СПФ 1000 кВАр на секциях РП-5, при раздельной работе секций ГПП

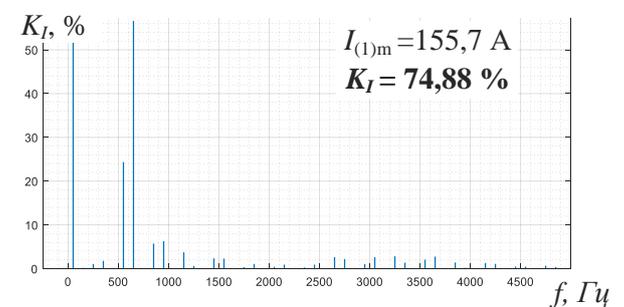


в)

Мгновенные значения фазного тока СПФ 2250 кВАр на секциях РП-5, при раздельной работе секций ГПП



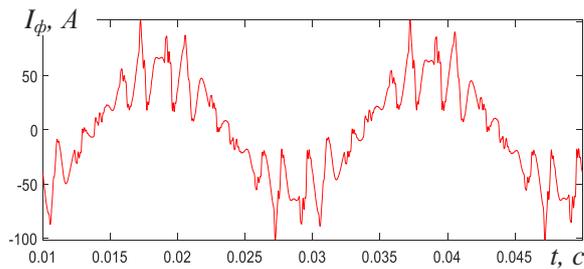
Гармонический состав фазного тока СПФ 2250 кВАр на секциях РП-5, при раздельной работе секций ГПП



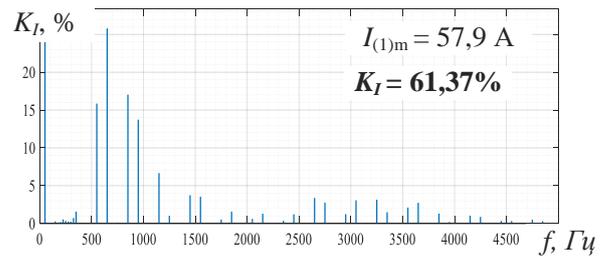
г)

Рисунок 4.11 - Анализ мгновенных значений фазного тока и гармонический состав при работе СПФ $L_p = 50$ мкГн на секции 2 ГПП при раздельной работе секций ГПП (а) мощностью 500 кВАр; (б) мощностью 750 кВАр; (в) мощностью 1000 кВАр; (г) мощностью 2250 кВАр.

Мгновенные значения фазного тока СПФ 750 кВАр на секциях РП-5, при раздельной работе секций ГПП

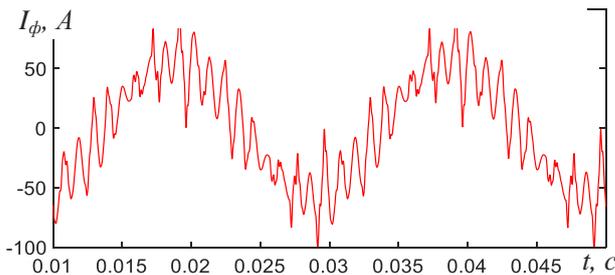


Гармонический состав фазного тока СПФ 750 кВАр на секциях РП-5, при раздельной работе секций ГПП

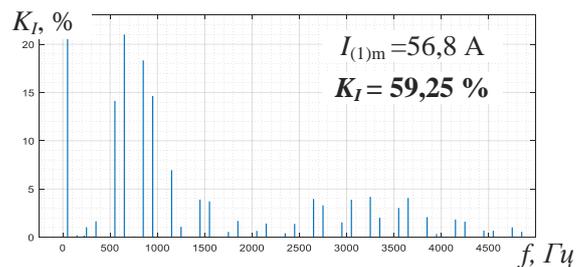


а)

Мгновенные значения фазного тока СПФ 750 кВАр на секциях РП-5, при совместной работе секций ГПП



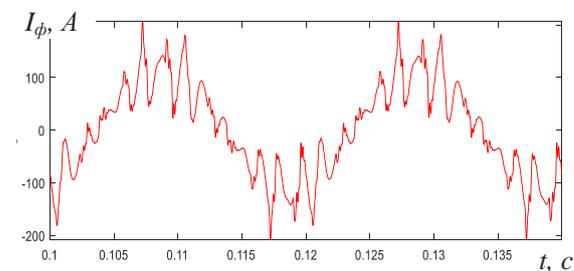
Гармонический состав фазного тока СПФ 750 кВАр на секциях РП-5, при совместной работе секций ГПП



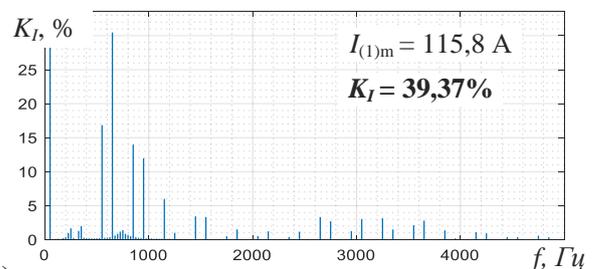
б)

Рисунок 4.12 - Анализ мгновенных значений фазного тока и гармонический состав при работе СПФ 750 кВАр $L_p = 200$ мкГн на секции 2 ГПП (а) при раздельной работе секций ГПП; (б) при совместной работе секций ГПП.

Мгновенные значения фазного тока СПФ 1500 кВАр на секциях РП-5, при раздельной работе секций ГПП

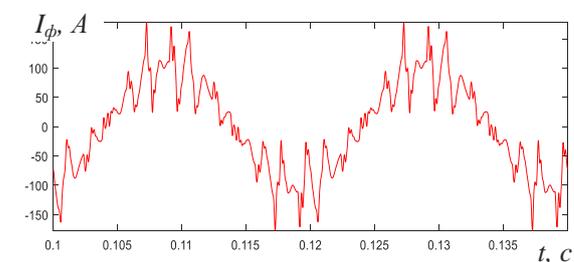


Гармонический состав фазного тока СПФ 1500 кВАр на секциях РП-5, при раздельной работе секций ГПП

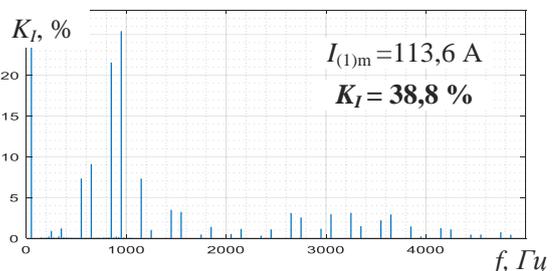


а)

Мгновенные значения фазного тока СПФ 1500 кВАр на секциях РП-5, при совместной работе секций ГПП



Гармонический состав фазного тока СПФ 1500 кВАр на секциях РП-5, при совместной работе секций ГПП



б)

Рисунок 4.13 - Анализ мгновенных значений фазного тока и гармонический состав при работе СПФ 1x1500 кВАр $L_p = 50$ мкГн на секции 2 ГПП (а) при раздельной работе секций ГПП; (б) при совместной работе секций ГПП.

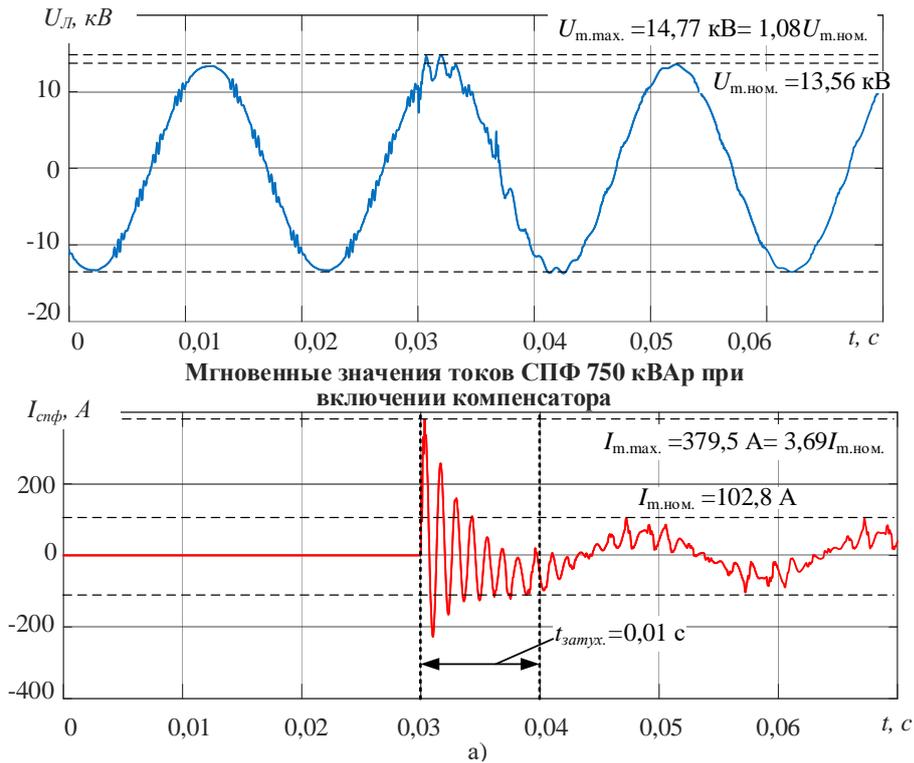
Необходимо отметить, что был проанализирован диапазон мощностей СПФ от 500 кВАр до 1500 кВАр с индуктивностями реактора фильтра $L_p = 50$ мкГн, 200 мкГн, 300 мкГн с точкой подключения в РУ-10 кВ РП-5 «Газоочистка». Суммарные коэффициенты искажения тока K_I , не превышающие 45%, были выявлены только для одной возможной конфигурации - один СПФ мощность 1500 кВАр и $L_p = 50$ мкГн как при раздельной работе секций ГПП, так и при совместной. В данной конфигурации СПФ $K_I = 39,37\%$ и $38,8\%$ соответственно (рисунок 4.13). Для всех остальных случаев, $K_I > 45\%$, что является неприемлемым (рисунок 4.11, 4.12). Превышение данного параметра приведет к выходу СПФ и серьезным аварийным ситуациям на производстве [116, 125].

4.2.4. Анализ величины броска тока и перенапряжения при включении СПФ

На последнем этапе проводится оценка величины броска тока и перенапряжения при включении СПФ с заданными параметрами (рисунок 4.14, 4.15).

Вследствие использования воздушных реакторов с малой индуктивностью $L_p = 50, 200$ или 300 мкГн, а также высокой эквивалентной емкости батарей конденсаторов, при включении СПФ могут возникать броски емкостного тока большой амплитуды, вызывающие кратковременные перенапряжения в сети 10 кВ. При использовании СПФ различных мощностей, подключаемых к секциям РУ-10 кВ РП-5 «Газоочистка», и различных режимов электроснабжения с параллельной работой секций ЗРУ-10 кВ ГПП и раздельной с питанием от одного из сетевых трансформаторов 220/10 кВ 2Т (1Т), были исследованы амплитуды бросков тока СПФ и уровни перенапряжений на секциях ЗРУ-10 кВ ГПП. Необходимо отметить, что исследования можно проводить для оптимальных конфигураций фильтров, которые успешно прошли предыдущие проверки, а именно: проверку на минимальный коэффициент искажения напряжения K_U и коэффициент искажения по току K_I , протекающему через конденсаторы [115-126].

Мгновенные значения линейных напряжений на секции 2 ЗРУ-10 кВ
ГПП при включении СПФ 750 кВАр



Мгновенные значения линейных напряжений на секции 2 ЗРУ-10 кВ
ГПП при включении СПФ 750 кВАр

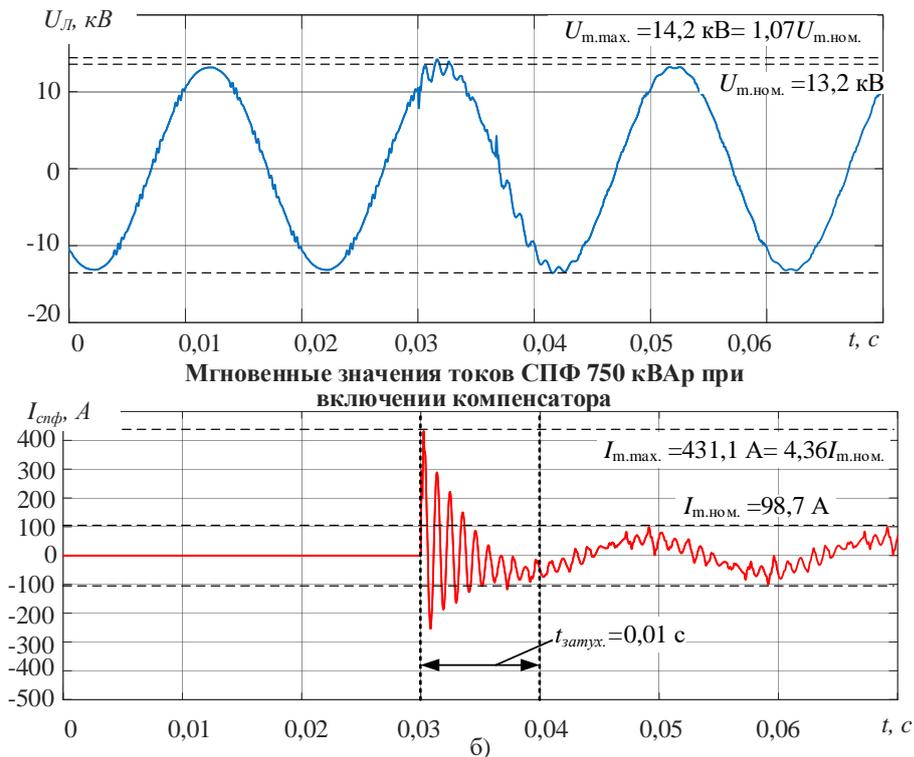


Рисунок 4.14 - Переходные процессы при включении одного СПФ 750 кВАр с $L_p=50 \text{ мкГн}$, установленного в РУ-10 кВ РП-5, (а) при отдельной работе; (б) при совместной работе секций ЗРУ-10 кВ ГПП (момент включения соответствует максимуму одного из U_L , $t=0,03 \text{ с}$)

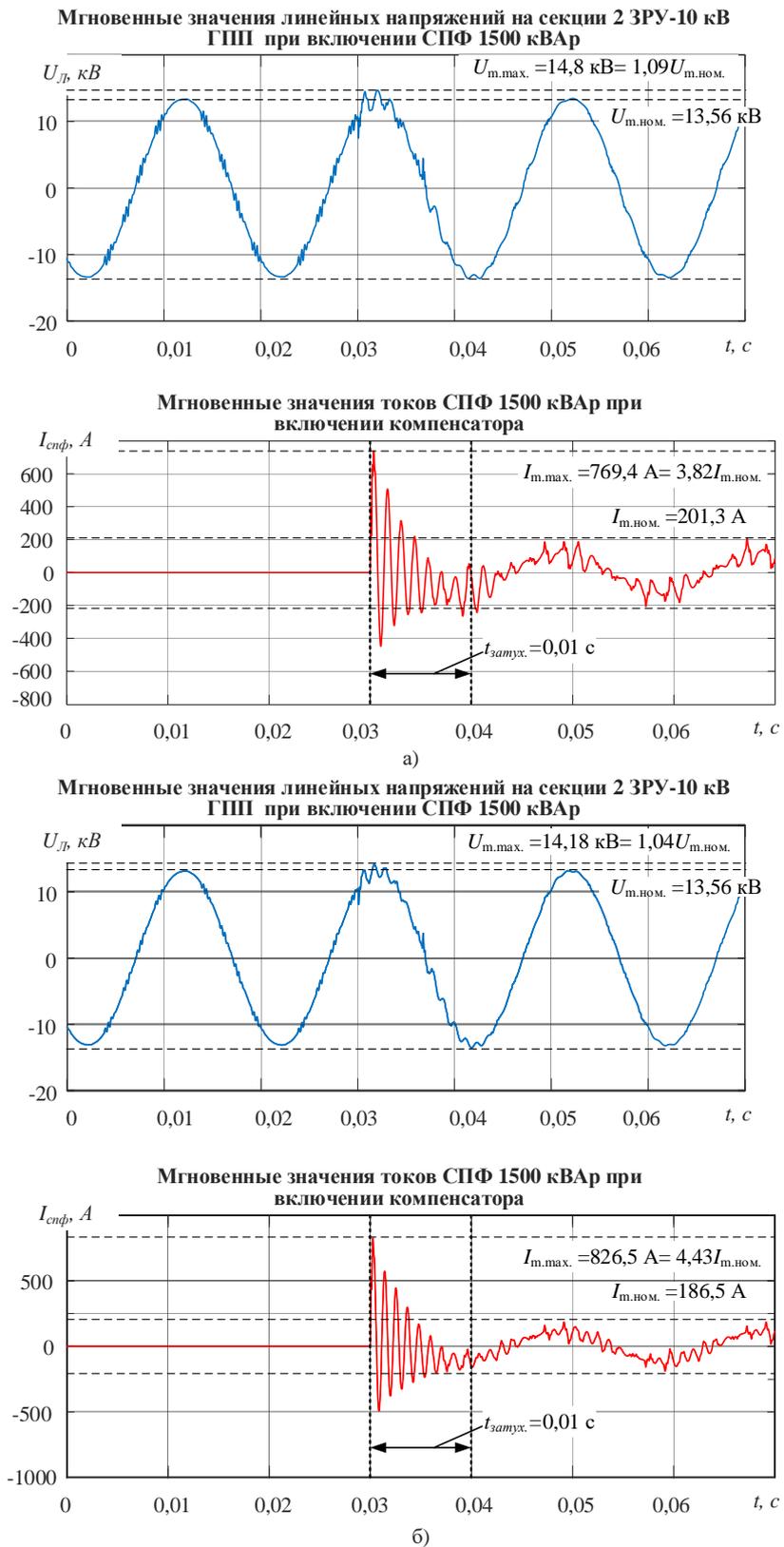


Рисунок 4.15 - Переходные процессы при включении одного СПФ 1500 кВАр с $L_p=50$ мкГн, установленного в РУ-10 кВ РП-5, (а) при раздельной работе; (б) при совместной работе секций ЗРУ-10 кВ ГПП (момент включения соответствует максимуму одного из U_L , $t=0,03$ с)

Остальные допустимые конфигурации параметров СПФ можно не анализировать ввиду отсутствия возможности их использования, вследствие превышения коэффициента искажения по току $K_I > 45\%$. В данном случае, для наглядности, в диссертации показаны броски тока и перенапряжения, при возможном другом исполнении СПФ, с другими параметрами емкости и индуктивности.

Результаты исследований приведены на рисунке 4.14, 4.15. Как видно из рисунков, в зависимости от начальной фазы питающего напряжения при включении СПФ 750 кВАр, $L_p = 50$ мкГн возникают кратковременные броски емкостного тока величиной до 3,69 номинальных амплитуд, вызывающие кратковременное повышение напряжения на секциях ЗРУ-10 кВ ГПП до $1,08U_{т.ном.}$ для раздельной работы секций, и $I_{м.мах.} = 4,36I_{т.ном.}$, вызывающие кратковременное повышение напряжения на секциях ЗРУ-10 кВ ГПП до $1,07U_{т.ном.}$ для совместной работы секций.

При включении СПФ 1x1500 кВАр, $L_p = 50$ мкГн возникают кратковременные броски емкостного тока величиной до $I_{м.мах.} = 3,82I_{т.ном.}$, вызывающие кратковременное повышение напряжения на секциях ЗРУ-10 кВ ГПП до $1,09U_{т.ном.}$ для раздельной работы секций, и $I_{м.мах.} = 4,43I_{т.ном.}$, вызывающие кратковременное повышение напряжения на секциях ЗРУ-10 кВ ГПП до $1,04U_{т.ном.}$ для совместной работы секций.

Время затухания бросков тока при текущей эквивалентной нагрузке электроприемников, подключенных к двум секциям ЗРУ-10 кВ ГПП, составляет $t_{затух.} = 10$ мс. В обоих случаях, как при раздельной работе секций, так и при совместной, данные значения бросков тока и увеличения напряжения на секциях являются приемлемыми и не оказывают негативного воздействия на режимы работы других электроприемников.

Нужно отметить, что для нормального функционирования СПФ, при его включении, должны быть предприняты меры по настройке уставки микропроцессорного расцепителя автоматических выключателей и релейной защиты, ввиду броска тока достигающего почти 5 номинальных амплитуд тока,

длящегося 10 мс. Для исключения отключения автоматического выключателя необходимо установить соответствующую характеристику срабатывания D или $10I_{ном}$, а также установить соответствующие уставки микропроцессорной релейной защиты на время переходного процесса при включении СПФ, во избежание аварийных ситуаций в питающей распределительной сети 10 кВ.

4.3. Уточненный анализ эффективности применения СПФ с использованием комплексной имитационной модели СЭС АО «Металлургический завод Балаково»

Для проверенных и выбранных параметров по новой методике СПФ необходимо выполнить анализ частотных характеристик сети 10 кВ для двух основных вариантов схемы электроснабжения с учетом различных комбинаций режимов работы СПФ 1x1500 кВАр, подключенного в распределительном устройстве РУ-10 кВ РП-5 «Газоочистка». Всего для первого варианта схемы электроснабжения (раздельная работа секций №1 и №2 ЗРУ-10 кВ) было предусмотрено 3 режима включения СПФ, а для второго варианта (параллельная работа секций №1 и №2 ЗРУ-10 кВ) – 4 режима. Описание режимов подробно приведено в таблице 4.2.

При исследовании частотных характеристик анализировались следующие параметры возникающего резонанса тока: 1) частота резонанса $f_{рез.т}$; 2) максимальное значение полного сопротивления (импеданса) при резонансе $Z_{мах}$; 3) начало частотного диапазона резонанса $f_{рез.т.н}$, при котором частотная характеристика сети 10 кВ $Z(f)$ становится выше естественной характеристики $Z_{ест.}(f)$, т.е. возникает эффект усиления гармоник; 4) конец частотного диапазона резонанса $f_{рез.т.к}$, при котором частотная характеристика $Z(f)$ опускается ниже $Z_{ест.}(f)$, что сопровождается эффектом ослабления гармоник. Частотные характеристики для каждого из рассматриваемых режимов приведены на рисунках 4.16-4.19. Параметры резонансов указаны в таблице 4.2 [29].

Следующие режимы выполнены для раздельной работы секций №1 и №2.

В режиме 1.1 (рисунок 4.16, а, б) СПФ на РУ-10 кВ РП-5 отключен, в РП-4 МЕСО1 также нет дополнительных ФКУ. В этом случае в частотных

характеристиках сети 10 кВ, построенных относительно секций №1 и №2, работающих отдельно, присутствуют сильные резонансы токов, частоты которых попадают в область генерирования высших гармоник преобразователей ТМЕИС. Это, как было рассмотрено выше во 2 главе, приводит к сильным искажениям напряжения на секции №2, от которой получает питание РП-4 МЕСО1. Следует отметить, что режим 1.1. для секции №2 соответствует реальной конфигурации электрической сети, использовавшейся весной 2015 г., когда наблюдались массовые выходы из строя ПЧ Siemens.

Для секции №1, при условии отдельной работы с секцией №2, наличие резонанса в области частот 1700 – 4300 Гц является менее критическим фактором, т.к. сети 10 кВ изолированы друг от друга и со стороны первой секции нет действующих преобразователей частоты с активными выпрямителями, где используются алгоритмы ШИМ. Однако при подключении нового ПЧ с активным выпрямителем, у которого гармонический состав входного тока будет включать в себя высшие гармоники высокого порядка, может возникнуть сильное искажение напряжения.

В режиме 1.2 (рисунок 4.16, в, г) в РП-5 включается дополнительный СПФ 1500 кВАр. Видно, что в этом случае резонансы токов переместились в низкочастотную часть характеристики возле области генерирования гармоник классических ПЧ, при этом практически не перекрывая эту зону. Резонансный пик значительно снизился. Это привело к существенному уменьшению искажения напряжения на секциях №1 и №2.

Для секции №2 возможно дальнейшее снижения величины K_U при условии включения двух ФКУ – фильтров 5 и 7 гармоник. Данный случай был предусмотрен в режиме 1.3 (рисунок 4.17). Здесь использование ФКУ 1, 2 с настройкой на 5 и 7 гармоники позволяет несколько снизить величину K_U за счет минимизации содержания в напряжении 10 кВ 5 и 7 гармоник. При использовании дополнительного СПФ мощностью 1500 кВАр, индуктивностью 50 мГн совместно с ФКУ в РП-4 МЕСО1 эффект будет максимальным (рисунок 4.17).

Таблица 4.2 - Исследование частотных характеристик сети 10 кВ при различных конфигурациях внутризаводского электроснабжения

Режимы работы СПФ 10 кВ при заданной конфигурации сети 10 кВ внутризаводской СЭС.	Исследуемая секция ЗРУ-10 кВ								Заключение об оптимальности конфигурации сети 10 кВ и режимов работы СПФ 10 кВ
	Секция №1				Секция №2				
	Начало частотного диапазона резонанса токов в сети 10 кВ, $f_{РЕЗ.Т.Н.}$, Гц	Частота резонанса токов $f_{РЕЗ.Т.}$, Гц	Конец частотного диапазона резонанса токов в сети 10 кВ, $f_{РТ.Т.К.}$, Гц	Максимальное значение импеданса при резонансе $Z_{МАХ}$, Ом	Начало частотного диапазона резонанса токов в сети 10 кВ, $f_{РЕЗ.Т.Н.}$, Гц	Частота резонанса токов $f_{РЕЗ.Т.}$	Конец частотного диапазона резонанса токов в сети 10 кВ, $f_{РТ.Т.К.}$, Гц	Максимальное значение импеданса при резонансе $Z_{МАХ}$, Ом	
<p>Раздельная работа секций №1 и №2 ЗРУ-10 кВ ГПП (старая конфигурация, весна 2015 г.). Питание секций №1 и №2 от двух трансформаторов Т1 и Т2 220/10 кВ. Межсекционный выключатель СРВ10-17 отключен. От секции №1 ЗРУ-10 кВ запитаны: РП-3 ЭСПЦ (все секции), РП-2 водоподготовка (все секции), РП-1 скрапное отделение (1 секция), РУ-10 кВ БВР. От секции №2 запитаны: РП-4 МЕСО1, МЕСО2 (обе секции), РП-5 газоочистка (обе секции). Кабельные линии 10 кВ на незадействованных фидерах секций №1 и №2 под напряжением (кроме ф.2, ф.21, ф.31). Питание секции Т от ТЭЦ-4.</p>									
Режим 1.1. Все компенсирующие устройства ФКУ -10 кВ, имеющие связь с секциями №1 и №2 ЗРУ-10 кВ, отключены, включая СПФ на РП-5 «Газоочистка» (рисунок 4.16, а, б).	1716 (n ≈ 35)	3277 (n ≈ 65)	4292 (n ≈ 86)	255 ($K_{У.МАХ} = 255/22,7 = 11,2$)	1808 (n ≈ 36)	2897 (n ≈ 58)	3821 (n ≈ 76)	251 ($K_{У.МАХ} = 12,6$)	Недопустимый режим. Сильные искажения напряжения на секции №2 ЗРУ-10 кВ при работе ПЧ ТМЕИС. На секции №1 также имеет место резонанс в высокочастотной области (возможна нормальная работа без ПЧ-АВ).

Продолжение таблицы 4.2

Режимы работы СПФ 10 кВ при заданной конфигурации сети 10 кВ внутризаводской СЭС.	Исследуемая секция ЗРУ-10 кВ								Заключение об оптимальности конфигурации сети 10 кВ и режимов работы СПФ 10 кВ
	Секция №1				Секция №2				
	Начало частотного диапазона резонанса токов в сети 10 кВ, $f_{РЕЗ.Т.Н}$, Гц	Частота резонанса токов $f_{РЕЗ.Т.}$, Гц	Конец частотного диапазона резонанса токов в сети 10 кВ, $f_{РТ.Т.К.}$, Гц	Максимальное значение импеданса при резонансе $Z_{МАХ}$, Ом	Начало частотного диапазона резонанса токов в сети 10 кВ, $f_{РЕЗ.Т.Н}$, Гц	Частота резонанса токов $f_{РЕЗ.Т.}$	Конец частотного диапазона резонанса токов в сети 10 кВ, $f_{РТ.Т.К.}$, Гц	Максимальное значение импеданса при резонансе $Z_{МАХ}$, Ом	
Режим 1.2. На РП-5 «Газоочистка» включены дополнительные СПФ 1500 кВАр. (рисунок 4.16, в, г).	586 (n ≈ 12)	938 (n ≈ 19)	1141 (n ≈ 23)	28 ($K_{У.МАХ} = 4,3$)	601 (n ≈ 12)	1018 (n ≈ 20)	1274 (n ≈ 26)	34 ($K_{У.МАХ} = 5,2$)	Приемлемый режим. Незначительное наложение резонансов на секциях №1 и №2 ЗРУ-10 кВ на низкочастотную область генерирования гармоник ПЧ.
Режим 1.3. Секция 2: на РП-5 включен дополнительный СПФ 1500 кВАр, на РП-4 МЕСО1 включены ФКУ 1,2 с фильтрами 5 и 7 гармоник (рисунок 4.17).	–	–	–	–	606 (n ≈ 12)	808 (n ≈ 16)	960 (n ≈ 19)	31 ($K_{У.МАХ} = 5,6$)	Оптимальный режим. Незначительное наложение резонансов на секции №2 ЗРУ-10 кВ на низкочастотную область генерирования гармоник ПЧ. Положительный эффект от фильтрации 5, 7 гармоник. Коэффициент K_U минимальный.

Продолжение таблицы 4.2

Режимы работы СПФ 10 кВ при заданной конфигурации сети 10 кВ внутризаводской СЭС.	Исследуемая секция ЗРУ-10 кВ								Заключение об оптимальности конфигурации сети 10 кВ и режимов работы СПФ 10 кВ
	Секция №1				Секция №2				
	Начало частотного диапазона резонанса токов в сети 10 кВ, $f_{РЕЗ.Т.Н}$, Гц	Частота резонанса токов $f_{РЕЗ.Т}$, Гц	Конец частотного диапазона резонанса токов в сети 10 кВ, $f_{РТ.Т.К}$, Гц	Максимальное значение импеданса при резонансе $Z_{МАХ}$, Ом	Начало частотного диапазона резонанса токов в сети 10 кВ, $f_{РЕЗ.Т.Н}$, Гц	Частота резонанса токов $f_{РЕЗ.Т}$	Конец частотного диапазона резонанса токов в сети 10 кВ, $f_{РТ.Т.К}$, Гц	Максимальное значение импеданса при резонансе $Z_{МАХ}$, Ом	
<p>Совместная работа секций №1 и №2 ЗРУ-10 кВ ГПП (текущая конфигурация, весна 2016 г.).</p> <p>Параллельная работа секций №1 и №2 от трансформатора Т2 220/10 кВ. Межсекционный выключатель СРВ10-17 включен.</p> <p>От секции №1 ЗРУ-10 кВ запитаны: РП-3 ЭСПЦ (все секции), РП-2 водоподготовка (все секции), РП-1 скрапное отделение (1 секция), РУ-10 кВ БВР, РП-4 МЕСО2 (обе секции), РП-5 газоочистка (обе секции). От секции №2 запитаны: РП-4 МЕСО1. Кабельные линии 10 кВ на незадействованных фидерах секций №1 и №2 под напряжением (кроме ф.2, ф.31). Питание секции Т от ТЭЦ-4.</p>									
Режим 2.1. Все компенсирующие устройства ФКУ -10 кВ, имеющие связь с секциями №№1-2 ЗРУ-10 кВ, отключены, включая СПФ на РП-5 «Газоочистка» (Рисунок 4.18, а)	1334 (n ≈ 27)	2372 (n ≈ 47)	3088 (n ≈ 62)	185,4 ($K_{У.МАХ}=11,3$)	1334 (n ≈ 27)	2372 (n ≈ 47)	3088 (n ≈ 62)	185,4 ($K_{У.МАХ}=11,3$)	Недопустимый режим. Имеют место сильные искажения напряжения на секциях ЗРУ-10 кВ при работе ПЧ ТМЕИС.

Продолжение таблицы 4.2

Режимы работы СПФ 10 кВ при заданной конфигурации сети 10 кВ внутризаводской СЭС.	Исследуемая секция ЗРУ-10 кВ								Заключение об оптимальности конфигурации сети 10 кВ и режимов работы СПФ 10 кВ
	Секция №1				Секция №2				
	Начало частотного диапазона резонанса токов в сети 10 кВ, $f_{РЕЗ.Т.Н}$, Гц	Частота резонанса токов $f_{РЕЗ.Т.}$, Гц	Конец частотного диапазона резонанса токов в сети 10 кВ, $f_{РТ.Т.К}$, Гц	Максимальное значение импеданса при резонансе $Z_{МАХ}$, Ом	Начало частотного диапазона резонанса токов в сети 10 кВ, $f_{РЕЗ.Т.Н}$, Гц	Частота резонанса токов $f_{РЕЗ.Т.}$, Гц	Конец частотного диапазона резонанса токов в сети 10 кВ, $f_{РТ.Т.К}$, Гц	Максимальное значение импеданса при резонансе $Z_{МАХ}$, Ом	
Режим 2.2. Все компенсирующие устройства УКРМ -10 кВ, имеющие связь с секциями №№1-2 ЗРУ-10 кВ, отключены, включая СПФ на РП-5. На РП-4 МЕСО1 включены ФКУ 1,2 (Рисунок 4.18, б).	1459 (n ≈ 29)	2502 (n ≈ 50)	3204 (n ≈ 64)	189,6 ($K_{У.МАХ}=11,0$)	1459 (n ≈ 29)	2502 (n ≈ 50)	3204 (n ≈ 64)	189,6 ($K_{У.МАХ}=11,0$)	Недопустимый режим. Имеют место сильные искажения напряжения на секциях ЗРУ-10 кВ при работе ПЧ ТМЕИС. Включение ФКУ в РП-4 вызывает усиление искажения напряжения.

Продолжение таблицы 4.2

Режимы работы СПФ 10 кВ при заданной конфигурации сети 10 кВ внутризаводской СЭС.	Исследуемая секция ЗРУ-10 кВ								Заключение об оптимальности конфигурации сети 10 кВ и режимов работы СПФ 10 кВ
	Секция №1				Секция №2				
	Начало частотного диапазона резонанса токов в сети 10 кВ, $f_{\text{РЕЗ.Т.Н}}$, Гц	Частота резонанса токов $f_{\text{РЕЗ.Т.}}$, Гц	Конец частотного диапазона резонанса токов в сети 10 кВ, $f_{\text{Р.Т.К}}$, Гц	Максимальное значение импеданса при резонансе $Z_{\text{МАХ}}$, Ом	Начало частотного диапазона резонанса токов в сети 10 кВ, $f_{\text{РЕЗ.Т.Н}}$, Гц	Частота резонанса токов $f_{\text{РЕЗ.Т.}}$, Гц	Конец частотного диапазона резонанса токов в сети 10 кВ, $f_{\text{Р.Т.К}}$, Гц	Максимальное значение импеданса при резонансе $Z_{\text{МАХ}}$, Ом	
Режим 2.3. Включен СПФ 1500 кВАр в РП-5 «Газоочистка» (Рисунок 4.18, в).	441 ($n \approx 9$)	660 ($n \approx 13$)	798 ($n \approx 15$)	21,2 ($K_{\text{У.МАХ}} = 4,7$)	441 ($n \approx 9$)	660 ($n \approx 13$)	798 ($n \approx 15$)	21,2 ($K_{\text{У.МАХ}} = 4,7$)	Приемлемый режим с точки зрения минимальной вероятности возникновения недопустимых искажений напряжения и приемлемой величины $K_{\text{У}}$.
Режим 2.4. Включены СПФ 1500 кВАр в РП-5 и ФКУ 1,2 в РП-4 МЕСО1 (Рисунок 4.19).	562 ($n \approx 6$)	694 ($n \approx 14$)	789 ($n \approx 9$)	21,0 ($K_{\text{У.МАХ}} = 4,4$)	562 ($n \approx 6$)	694 ($n \approx 14$)	789 ($n \approx 9$)	21,0 ($K_{\text{У.МАХ}} = 4,4$)	Оптимальный режим. По сравнению с режимом 2.3 имеет дополнительный эффект в фильтрации 5 и 7 гармоник. Коэффициент $K_{\text{У}}$ минимальный.

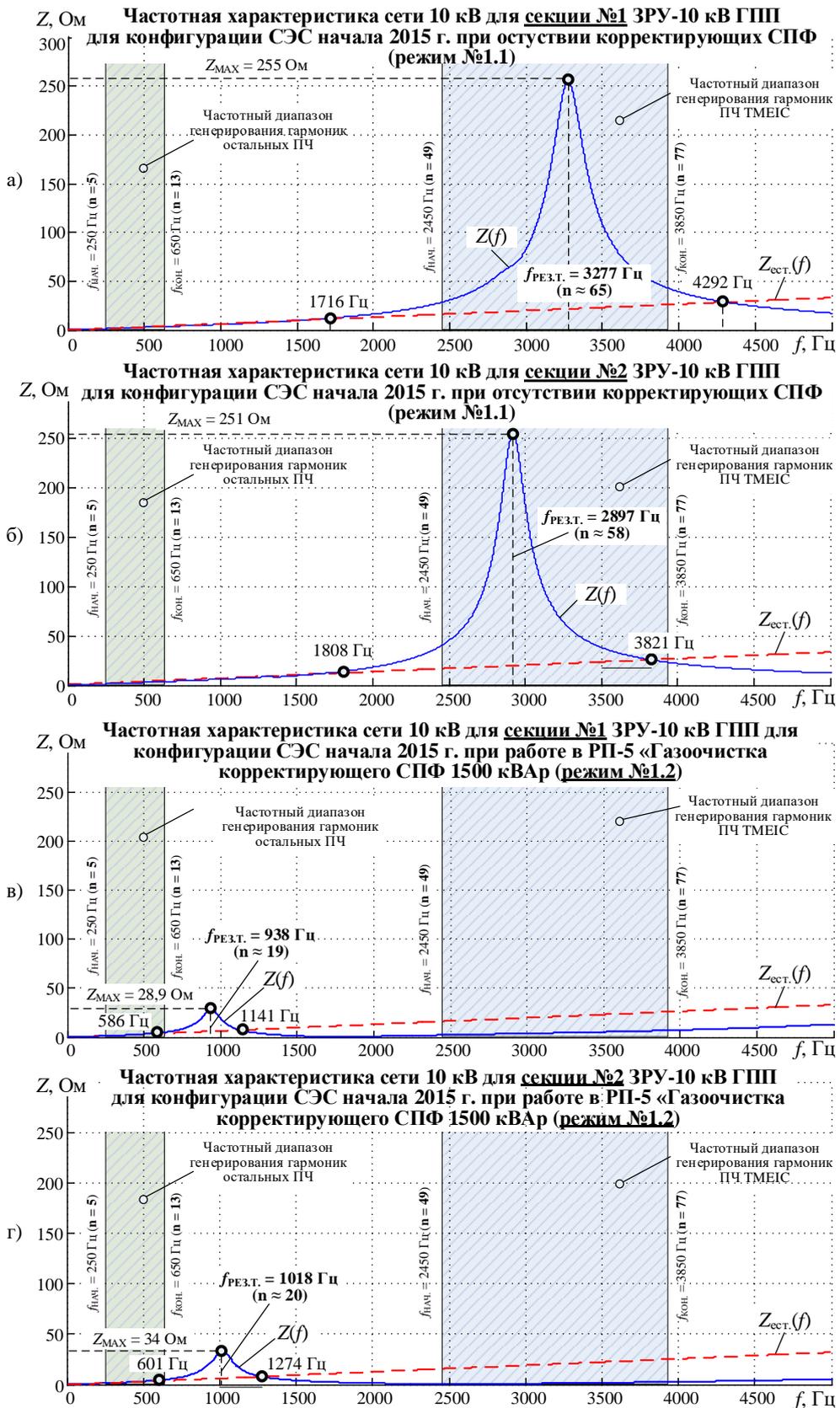


Рисунок 4.16 - Анализ частотных характеристик сети 10 кВ внутривозовского электроснабжения АО «Металлургический завод Балаково» для режимов 1.1, 1.2 при раздельной работе секций №1 и №2 ЗРУ-10 кВ ГПП

Частотная характеристика сети 10 кВ для секции №2 ЗРУ-10 кВ ГПП для конфигурации СЭС начала 2015 г. при использовании дополнительного СПФ 1500 кВАр и $L_p=50$ мкГн в РП-5 и включенного ФКУ1,2 в РП-4 МЕСО1 (режим №1.3)

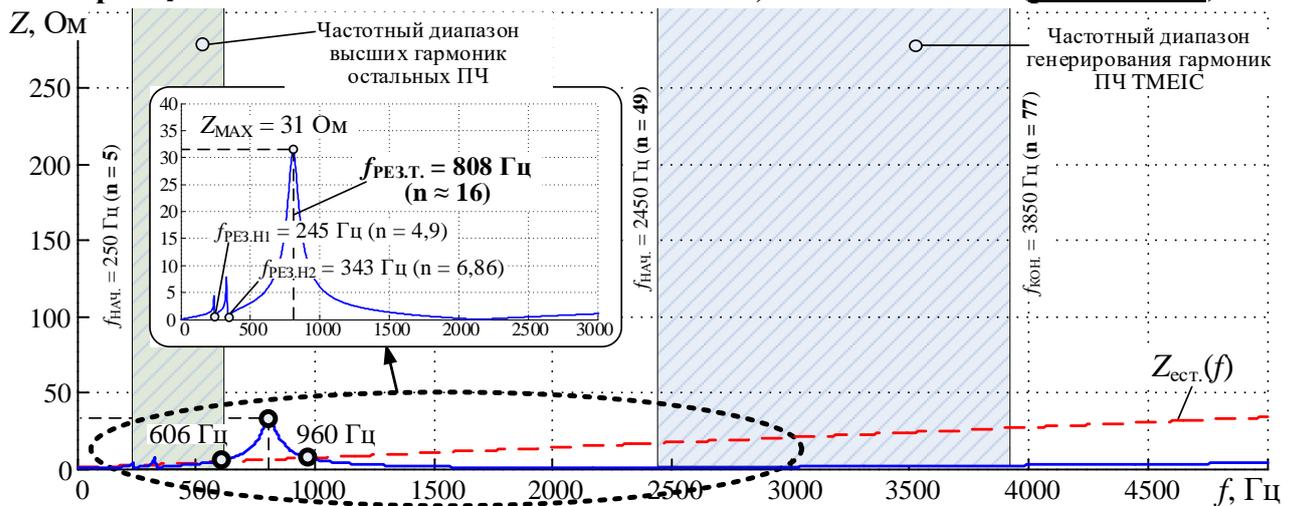
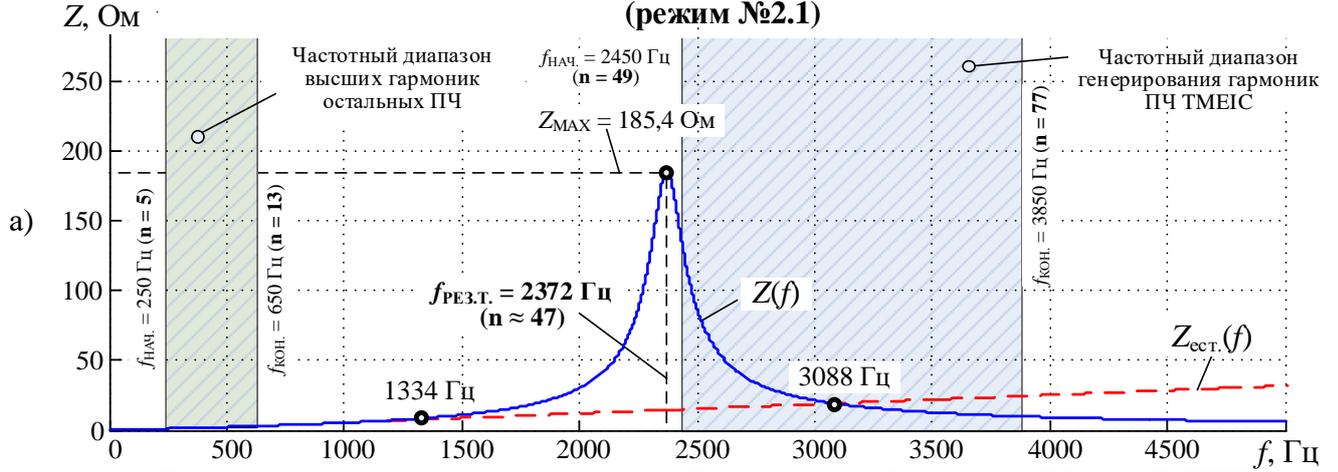


Рисунок 4.17 - Анализ частотных характеристик сети 10 кВ внутривзаводского электроснабжения АО «Металлургический завод Балаково» для режима 1.3 при раздельной работе секций №1 и №2 ЗРУ-10 кВ ГПП

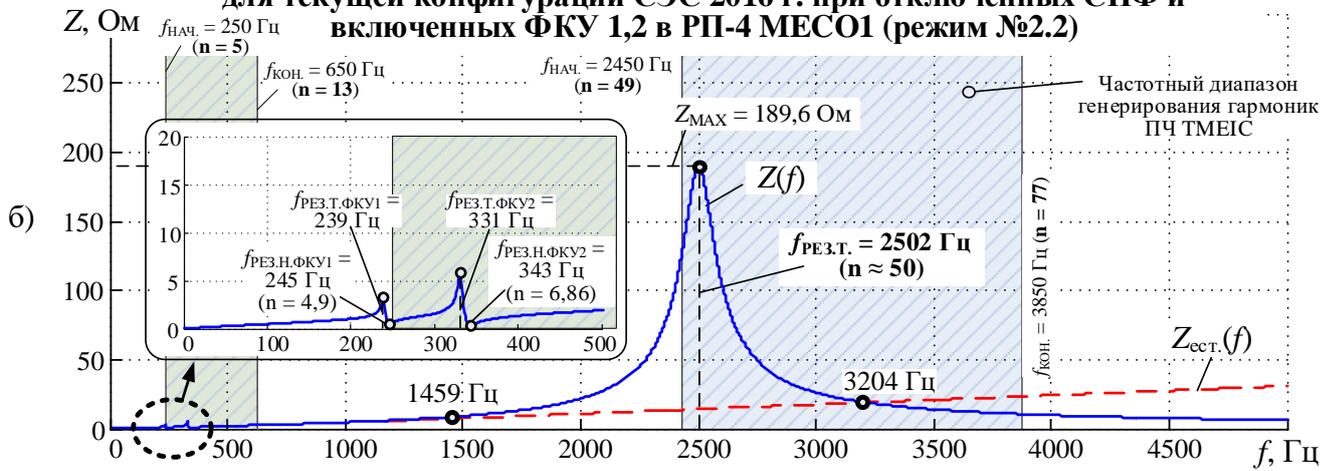
Следующие режимы выполнены для параллельной работы секций №1 и №2.

В режиме 2.1 (рисунок 4.18, а) все ФКУ и СПФ в РП-5 «Газоочистка» выведены из работы. В этом случае, как и в режиме 1.1, наблюдается резонанс токов, усиливающий высокочастотные гармоники ПЧ ТМЕИС1-3. Однако в отличие от режима 1.1 из-за увеличенной суммарной емкости кабельных линий частота резонанса смещена в область более низких частот на 905 Гц. В результате этого уровень искажений при работе ПЧ ТМЕИС в условиях наличия резонанса будет ниже, чем в схеме с раздельными секциями, и резонанс будет охватывать только часть диапазона генерирования высокочастотных гармоник ТМЕИС. Несмотря на это уровень искажений напряжения 10 кВ будет существенным, выше нормативных значений по ГОСТ [14]. Включение ФКУ №1, 2, настроенных на 5 и 7 гармонику, в РП-4 без наличия СПФ в РП-5 не даст положительного эффекта и вызовет усиление искажений из-за смещения резонанса токов вправо по шкале частот (режим 2.2, рисунок. 4.18, б). По этой причине нужно предусмотреть организационные мероприятия по исключению работы фильтров 5 и 7 гармоник при отключенных дополнительных корректирующих СПФ в РП-5.

Частотная характеристика сети 10 кВ для секций №1 и №2 ЗРУ-10 кВ ГПП для текущей конфигурации СЭС 2016 г. при отключенных СПФ (режим №2.1)



Частотная характеристика сети 10 кВ для секций №1 и №2 ЗРУ-10 кВ ГПП для текущей конфигурации СЭС 2016 г. при отключенных СПФ и включенных ФКУ 1,2 в РП-4 МЕСО1 (режим №2.2)



Частотная характеристика сети 10 кВ для секций №1 и №2 ЗРУ-10 кВ ГПП для текущей конфигурации СЭС 2016 г. В РП-5 включен дополнительный СПФ 1500 кВАр (режим №2.3)

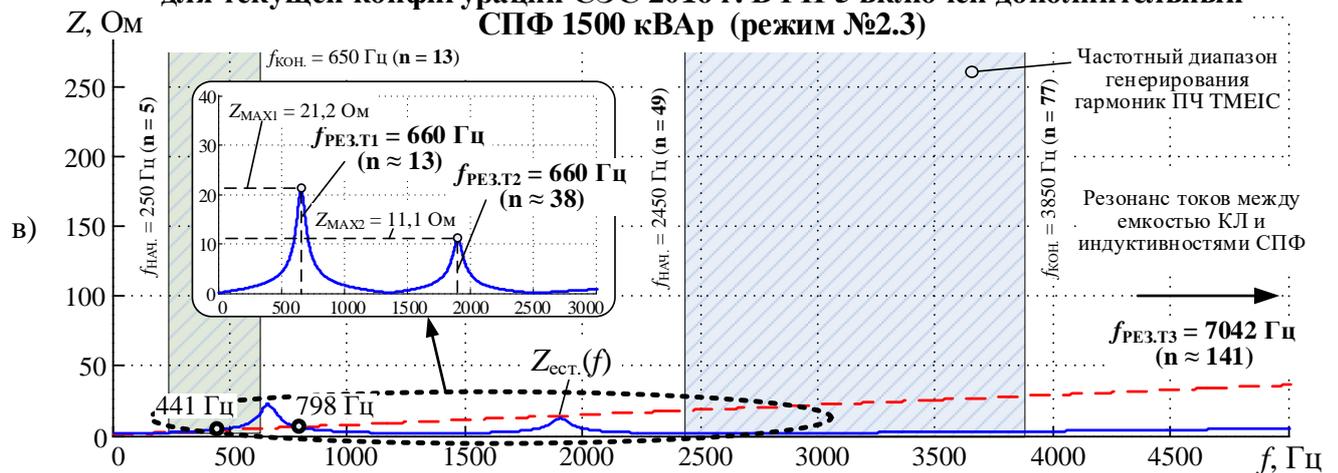


Рисунок 4.18 - Анализ частотных характеристик сети 10 кВ внутризаводского электроснабжения АО «Металлургический завод Балаково» для режимов 2.1–2.3 при совместной работе секций №1 и №2 ЗРУ-10 кВ ГПП

В режиме 2.3 (рисунок 4.18, в) в РП-5 используются СПФ. В случае включения СПФ 1500 кВАр резонансный максимум, образованный емкостью кабелей, емкостью конденсаторов и индуктивностью Т2, перемещается в область низких частот. У низкочастотного резонанса токов уменьшаются амплитуда и частота резонанса. Также необходимо отметить появление в области высокочастотной области более 5000 Гц дополнительного резонанса токов, образованного индуктивностью воздушного реактора СПФ и эквивалентной емкостью сети. Данный резонанс находится правее зоны генерирования высокочастотных гармоник ТМЕИС и не оказывает влияния на искажение напряжения. Данный режим является приемлемыми с точки зрения обеспечения заданного качества напряжения.

Частотная характеристика сети 10 кВ для секций №1 и №2 ЗРУ-10 кВ ГПП для текущей конфигурации СЭС 2016 г. В РП-5 включен СПФ 1500 кВАр, в РП-4 МЕСО1 включены ФКУ1,2 (режим №2.4)

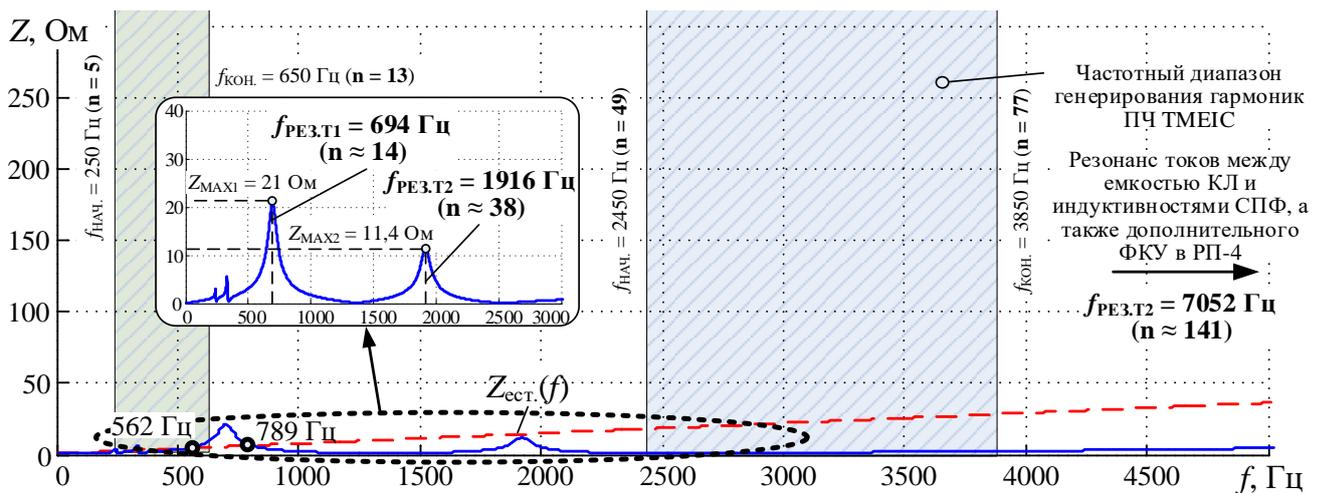


Рисунок 4.19 - Анализ частотных характеристик сети 10 кВ внутризаводского электроснабжения АО «Металлургический завод Балаково» для режима 2.4 при совместной работе секций №1 и №2 ЗРУ-10 кВ ГПП

В режиме 2.4 (рисунок 4.19) помимо подключённого в РП-5 СПФ, используется ФКУ на 5 и 7 гармоники. Происходит дальнейшее снижение величины K_U при условии включения двух ФКУ — фильтров 5 и 7 гармоник. Использование данных ФКУ совместно с СПФ 1500 мощностью кВАр и индуктивностью 50 мкГн позволяет дополнительно снизить величину K_U за счет минимизации содержания в напряжении 10 кВ 5 и 7 гармоник по сравнению с

режимом 2.3. При использовании дополнительного СПФ мощностью 1500 кВАр, индуктивностью 50 мкГн совместно с ФКУ в РП-4 МЕСО1 эффект будет максимальным (рисунок 4.19).

Для конфигурации сети 10 кВ, когда секции №1 и №2 ЗРУ-10 кВ работают параллельно с включенным секционным выключателем, оптимальным с точки зрения надежности работы электроприводов и приемлемого значения коэффициента K_U является режим 2.4 (рисунок 4.19). В этом случае в РП-5 «Газоочистка» включен один СПФ мощностью 1500 кВАр с индуктивностью 50 мкГн, и в РП-4 – МЕСО1 работают ФКУ 1,2, фильтрующие 5 и 7 гармоники.

4.4. Выводы по главе

1. Разработан новый способ обеспечения ЭМС мощных ЭП с ПЧ-АВ, отличающийся от известных тем, что для повышения ПКЭ используется новый вид фильтрокомпенсирующих устройств – СПФ, обеспечивающий сдвиг опасного параллельного резонанса высокочастотной области частотной характеристики сети 6-35 кВ в безопасную зону, где отсутствует наложение высокочастотных гармоник ПЧ-АВ.

2. Разработана новая методика определения основных параметров СПФ с использованием разработанной имитационной модели металлургического комплекса АО «Металлургический завод Балаково», где реализованы распределительная сеть среднего напряжения и модели электроприводов на базе ПЧ-АВ. Методика включает в себя следующие положения: 1) на основании разработанной имитационной модели выбирается место установки СПФ; 2) определение оптимальной мощности корректирующего фильтра с использованием оптимального критерия – минимальное значение суммарного коэффициента гармонической составляющей напряжения K_U , рассчитанного до 150 гармоники на общих секциях ГПП; 3) при выбранной мощности СПФ должна обеспечиваться минимальная величина суммарного коэффициента гармонической составляющей тока K_I , не превышающая 45% для возможности эксплуатации конденсаторов с пленочным полипропиленовым диэлектриком; 4) проведение дополнительной

проверки на возникновение недопустимых уровней бросков тока и напряжений при подаче напряжения на СПФ.

3. Для рассматриваемого металлургического предприятия АО «Металлургический завод Балаково» на основании методики определены оптимальные параметры СПФ: 1) мощность данного фильтра составляет $Q_C = 1500$ кВАр; 2) емкость конденсаторных батарей на фазу $C = 47,7$ мкФ; 3) собственная частота настройки $f_n = 3250$ Гц; 4) индуктивность $L_P = 50$ мкГн и сопротивление проводника $R \approx 0,85$ мОм реактора; 5) добротность $Q = 1200$. Применение СПФ с определенной конфигурацией позволяет обеспечить технический эффект по уменьшению коэффициента искажения напряжения K_U на общих секциях ЗРУ-10 кВ ГПП до уровня $K_U = 2,14\%$ для отдельной работы секций и $K_U = 2,05\%$ для совместной работы секций, при суммарном коэффициенте гармонических искажений тока конденсаторных батарей в СПФ $K_I = 39,37\%$ и $38,8\%$ для отдельной работы секций и совместной. При включении СПФ возникают кратковременные броски емкостного тока величиной до $I_{m.max.} = 3,82I_{m.ном}$ и $I_{m.max.} = 4,43I_{m.ном}$, вызывающие кратковременное повышение напряжения на секциях ЗРУ-10 кВ ГПП до $1,09U_{т.ном.}$ и $1,04U_{т.ном.}$ для отдельной и совместной работы секций, соответственно. Время затухания бросков тока при текущей эквивалентной нагрузке электроприемников, подключенных к двум секциям ЗРУ-10 кВ ГПП, составляет $t_{затух.} = 10$ мс.

4. По итогам исследования сделан вывод, что СПФ – это одночастотный фильтр, параметры которого выбраны по специализированной методике, предусматривающий выбор резонансной частоты и настройку его в районе максимума резонанса частотной характеристики без привязки к определенным гармоникам ПЧ-АВ, генерируемым в сеть. Данное устройство является высокочастотным. Задача применения данного фильтра заключается не в фильтрации конкретной гармоники, как это обычно происходит при традиционной настройке и использовании ФКУ, а в смещении экстремума параллельного резонанса токов в безопасную область частотной характеристики, где отсутствуют гармоники, генерируемые применяемыми ПЧ-АВ.

ГЛАВА 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СПФ В СЭС АО «МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ ЗАВОД БАЛАКОВО»

На завершающем этапе проведены экспериментальные исследования эффективности нового способа улучшения ЭМС мощных электроприводов скоростных проволочных блоков СПБ №1,2,3 с ПЧ-АВ ТМЕИС с распределительной сетью 10 кВ за счет применения СПФ, параметры которого рассчитаны по новой методике [115-125]. По итогу, данное устройство позволяет влиять на частотную характеристику сети и смещать резонанс тока, тем самым исключая резонанс в сети.

5.1. Технические данные реализованного СПФ на металлургическом заводе АО «Металлургический завод Балаково»

На основании проведенных исследований в главе 4, были даны предварительные рекомендации о применения СПФ с суммарной мощностью 1500 кВАр, емкостью конденсаторных батарей 47,7 мкФ, собственной частотой настройки 3250 Гц и индуктивностью реактора 50 мкГн. Данные рекомендации были переданы компании заводу-изготовителю ФКУ фирме ENERLUX POWER s.r.l. для реализации СПФ. С учетом ограниченного габарита места расположения СПФ в РП-5 «Газоочистка», возможностью подключения двух устройств и присутствия в линейке изготовителя производимых ФКУ типовых, серийных устройств, было принято оптимальное решение о разделении на две части и использовании двух СПФ со следующими параметрами эквивалентными одинарному СПФ мощностью 1500 кВАр: 1) индуктивность $L_P = 100$ мкГн; 2) емкость конденсаторных батарей $C = 23,9$ мкФ на фазу; 3) мощность $Q_C = 750$ кВАр. Использование двух СПФ мощностью 750 кВАр позволяет уменьшить габарит, уменьшить время поставки устройства от завода-изготовителя и осуществлять постепенное последовательное включение СПФ, с целью уменьшения пускового тока по сравнению с одним СПФ мощностью 1500 кВАр. Технические данные дополнительных СПФ 2x750 кВАр, рекомендованных к

установке в РП-5 «Газоочистка» для коррекции частотной характеристики сети 10 кВ, приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 - Технические данные дополнительных СПФ

Наименование параметра	Значение параметра
1. Номинальное напряжение, кВ	10,0
2. Номинальная мощность СПФ, кВАр	750
3. Емкость батарей конденсаторов на фазу, мкФ	3 x 23,9
3. Индуктивность реактора для ограничения броска тока при включении СПФ, мкГн	100
4. Номинальный ток, А	43,3
5. Номинальная частота, Гц	50,0
6. Способ включения батарей конденсаторов	Две конденсаторные группы, соединенные в звезду с нейтральным проводом, для реализации защиты при выходе из строя емкостных элементов.
7. Степень защиты электрооборудования СПФ	IP00
8. Уровень изоляции электрооборудования, кВ	38/95
9. Тип используемых конденсаторов	Материал: два тонких алюминиевых листа Диэлектрик: полипропиленовая пленка, тип изоляционной жидкости: биоразлагаемое масло тип изоляторов: фарфор;

Продолжение таблицы 5.1

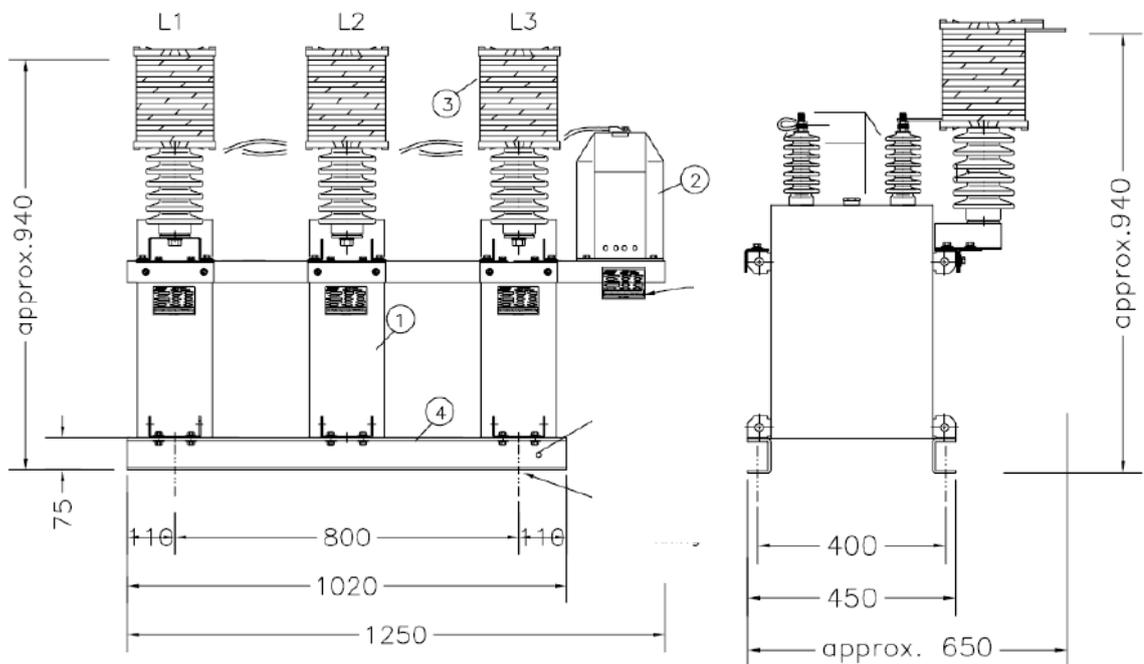
Наименование параметра	Значение параметра
10. Общая масса устройства, кг	170
11. Температурный режим эксплуатации, °С	-37 ... +40

Чертеж с габаритами и основным конструктивным исполнением дополнительных СПФ, приведен на рисунке 5.1.

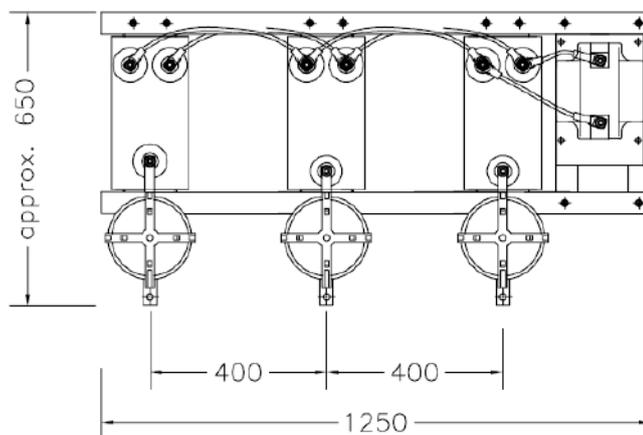
Чертеж СПФ 750 кВАр

Вид спереди

Вид сбоку



Вид сверху



- 1) Разделенный, двойной с группой соединения Y/Y однофазный конденсатор $Q_C=250$ кВАр, $U=5,77$ кВ, $f=50$ Гц;
- 2) Трансформатор тока с реле защиты от асимметрии;
- 3) Однофазный реактор;
- 4) Каркас из нержавеющей стали.

Рисунок 5.1 – Чертеж дополнительных СПФ

Однолинейная электрическая схема СПФ приведена на рисунке 5.2. Чертеж с габаритами и основным конструктивным исполнением конденсаторной батареи в составе дополнительных СПФ, приведен на рисунке 5.3. Схема подключения дополнительного СПФ №1 в РП-5 РУ-10 кВ приведена на рисунке 5.4.

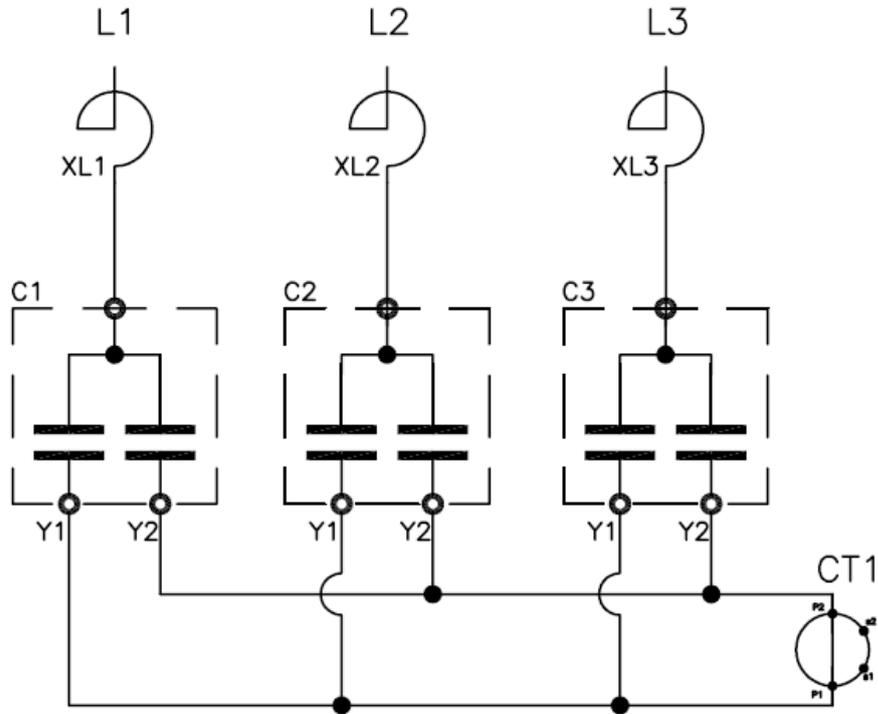


Рисунок 5.2 – Схема электрическая однолинейная дополнительных СПФ

Чертеж конденсаторных блоков

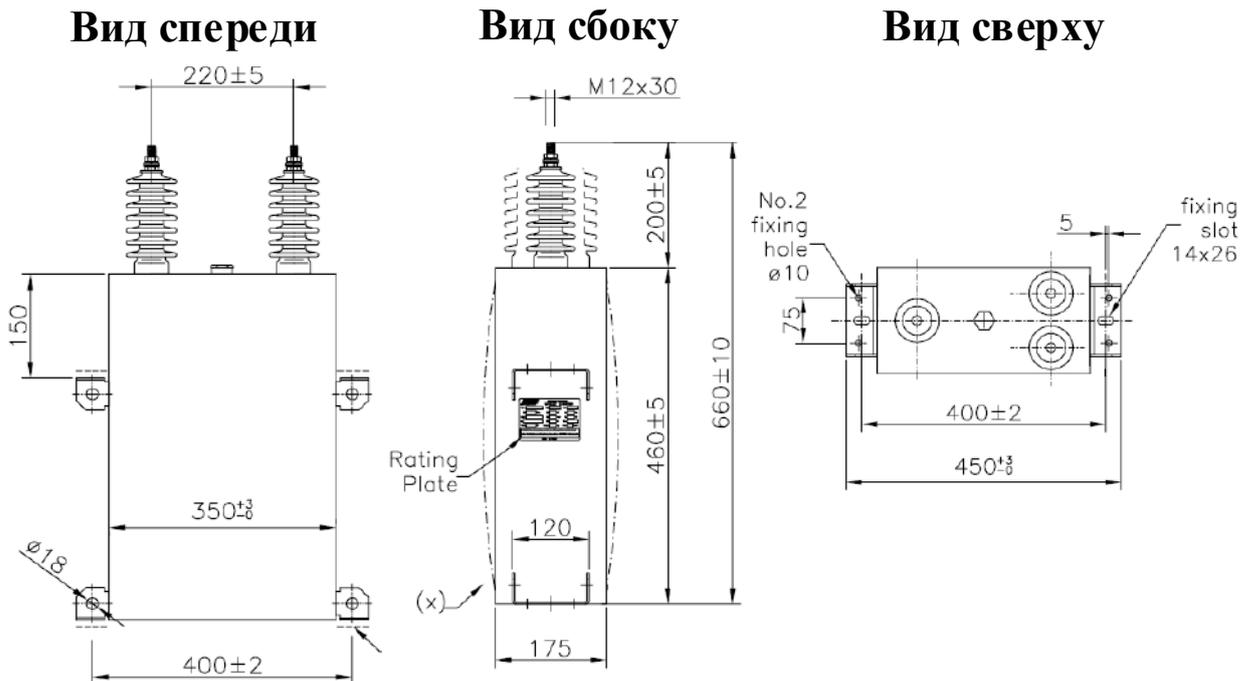


Рисунок 5.3 – Чертеж конденсаторных батарей в составе дополнительных СПФ

СХЕМА ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРИНЦИПАЛЬНАЯ ПОДКЛЮЧЕНИЯ СПФ – 10 кВ 750 кВАр
к ячейке номер 11 в РП-5 РЧ-10кВ.

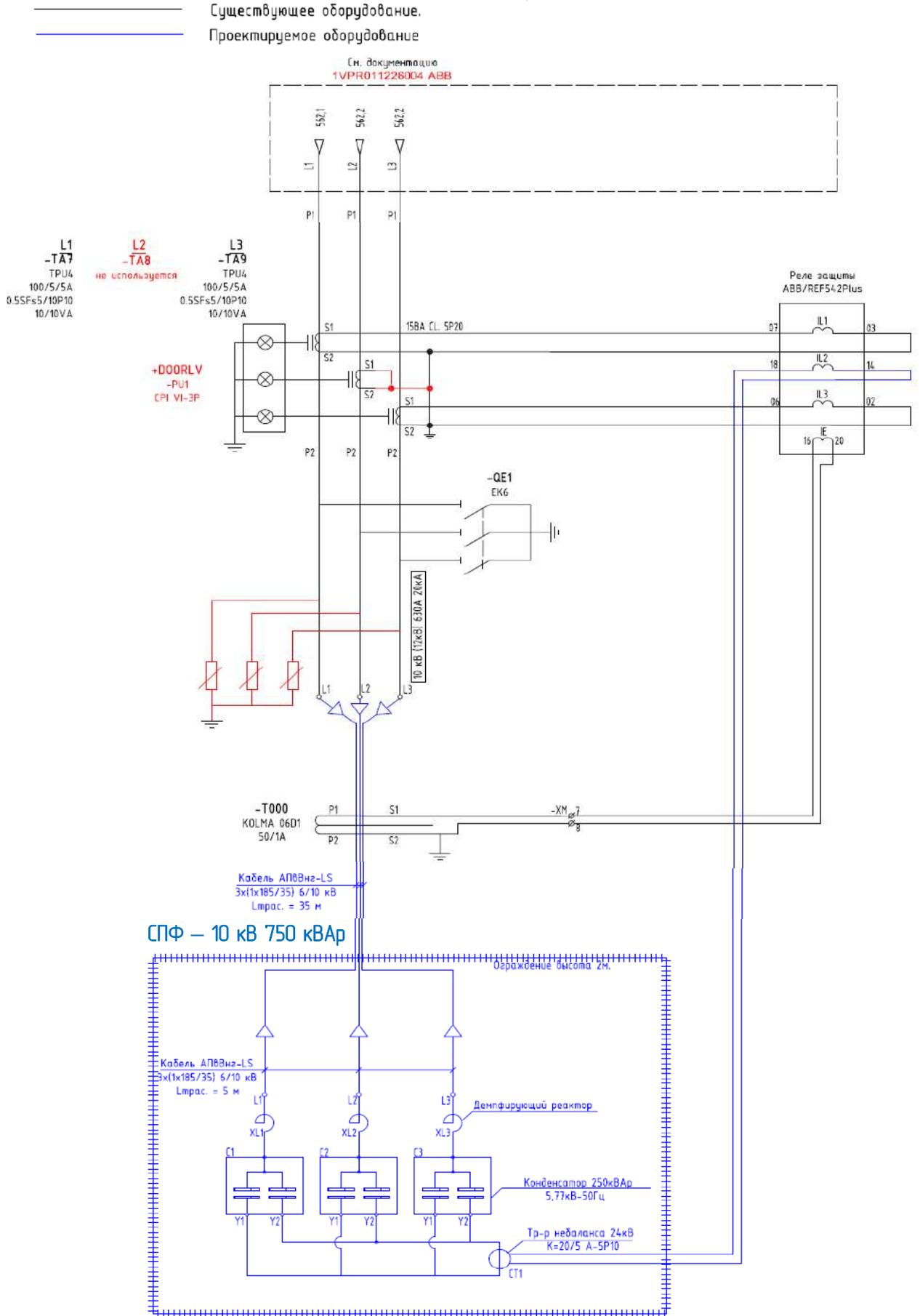


Рисунок 5.4 – Схема электрическая принципиальная подключения СПФ

Технические данные конденсаторных батарей приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 - Технические данные конденсаторных батарей в составе дополнительных СПФ,

Наименование параметра	Значение параметра
1. Номинальное напряжение, кВ	5,77
2. Номинальная мощность конденсаторных батарей, кВАр	250 (125+125)
3. Емкость батарей конденсаторов на фазу, мкФ	23,9 -3/+5%
4. Номинальный ток, А	43,3
5. Номинальная частота, Гц	50,0
6. Масса, кг	44
5. Материал корпуса	нержавеющая сталь

Проектное внедрение двух СПФ осуществлялось совместно со специалистами фирмы ООО «СИНТЕК» (г. Москва, Россия). Для подключения СПФ №1 была задействована резервная ячейка №11», для СПФ №2 задействована резервная ячейка №6 в РУ-10 кВ РП-5 «Газоочистка». Подключение дополнительных СПФ №1,2 осуществляется кабелем с алюминиевой токопроводящей жилой с изоляцией из сшитого полиэтилена марки АПвВнг-LS. Сечения кабелей были выбраны с учетом превышения значения длительно допустимого тока $I_{длит.доп.}$ в 1,3-1,7 раза максимально возможных действующих значений токов СПФ при наличии высших гармоник при уровне $K_{I,max} = 45\%$, а также с учетом броска тока при включении фильтра до 5 номинальных амплитуд тока продолжительностью 10 мс. Исследования параметров подробно рассмотрены в главе 4. Данный запас обусловлен обеспечением надежной работы кабельной линии в условиях большого содержания высших гармоник в потребляемых токах СПФ. Параметры кабельных линий для подключения дополнительных СПФ к секциям РУ-10 кВ РП-5 приведены в таблице 5.3. Схема подключения дополнительного СПФ №2 в РП-5

РУ-10 кВ аналогична схеме, представленной на рисунке 5.4. Также на основании информации, предоставленной специалистами МГТУ им. Носова, фирмой ООО «СИНТЕК» были скорректированы отстройки токов релейной защиты для ячеек, к которым подключаются дополнительные СПФ, для исключения ложного срабатывания защиты в момент пуска устройств.

Таблица 5.3 - Параметры кабельных линий 10 кВ для подключения СПФ к секциям РУ-10 кВ РП-5 «Газоочистка»

Начало трассы	Конец трассы	Марка кабеля	$I_{\text{длит. доп.}}$ А	Длина, м	Число ниток
РП-5 РУ-10 кВ яч. 11	СПФ №1 750 кВАр	АПВВнг(А)-LS 3(1x185/25) 6/10 кВ	390	40	3
РП-5 РУ-10 кВ яч. 6	СПФ №2 750 кВАр	АПВВнг(А)-LS 3(1x185/25) 6/10 кВ	390	40	3

Фотографии дополнительных СПФ 2x750 кВАр фирмы ENERLUX POWER s.l.r., внедренных на металлургический завод «АО Металлургический завод Балаково» с целью улучшения ЭМС мощных ПЧ-АВ с распределительной сетью, представлены на рисунке 5.5, 5.6.



Рисунок 5.5 – Фотография СПФ производства компании ENERLUX POWER s.l.r



Рисунок 5.6 – Фотографии СПФ мощностью 2×750 кВАр, $L_p = 100$ мкГн фирмы производителя ENERLUX POWER s.l.r, внедренного на предприятие с установкой в РП-5 «Газоочистка»

5.2. Экспериментальные исследования эффективности разработанного СПФ на металлургическом заводе АО «Металлургический завод Балаково»

Исследования показали, что ключевыми элементами в системе внутривозовского электроснабжения 10 кВ, влияющими на параметры резонанса токов в высокочастотной области частотной характеристики сети 10 кВ, являются рекомендованные СПФ №№1,2 на РП-5 «Газоочистка», работающие последовательно с малой индуктивностью. Из-за высокой емкости батарей конденсаторов при подключении к одной из секций ЗРУ-10 кВ ГПП возникает перемещение резонансной частоты из высокочастотной области в

низкочастотную зону с одновременным уменьшением резонансного пика. В этом случае гармоники, генерируемые ПЧ ТМЕІС1-3 в области $n = 49 - 77$, перестают усиливаться частотной характеристикой сети, и их содержание в напряжении 10 кВ становится минимальным [115-123].

На рисунке 5.7 приведены осциллограммы мгновенных значений напряжения на секции ЗРУ-10 кВ, полученные в ходе проведения эксперимента по оценке эффективности коррекции частотной характеристики с помощью СПФ. В первом случае к секции №2 ЗРУ-10 кВ подключено только РП-4 МЕСО1, остальные электроприемники переведены на первую секцию. Отходящие фидеры секции 2 включены, кабели находятся под напряжением. В этом случае при отсутствии дополнительных СПФ в сети 10 кВ возникает резонанс токов на частотах, соответствующих области генерирования высших гармоник ПЧ ТМЕІС1-3, что приводит к сильному искажению формы напряжения. В данном случае на рисунке 5.7, а и б показаны кривая напряжения и ее гармонический состав при работе ПЧ ТМЕІС1. После перевода РП-5 «Газоочистка», где установлены дополнительные СПФ №1,2 2x750 кВАр и РП-4 МЕСО1 на параллельную работу с питанием от одной и той же секции ЗРУ-10 кВ ГПП резонанс токов смещается в область низкочастотных гармоник, что приводит к значительному улучшению гармонического состава напряжения (рисунок 5.7, в и г). При включении двух активных выпрямителей ПЧ ТМЕІС1-2 качество напряжения также остается на приемлемом уровне (рисунок 5.7, д, е). При проведении эксперимента на РП-5 «Газоочистка» работали два СПФ №1,2 750 кВАр.

Дополнительно проведено сравнение реального гармонического состава напряжения на секциях ЗРУ-10 кВ заводской ГПП с результатами имитационного моделирования, полученными в 4 главе. За основу был взят режим параллельной работы РУ РП-4 МЕСО1 (в работе ПЧ ТМЕІС1-2) и РП-5 «Газоочистка» с включенными дополнительными СПФ №1,2 750 кВАр. Сравнение осциллограмм мгновенных значений на рисунке 5.8 показывает, что разработанная имитационная модель является адекватной в плане воспроизведения частотной характеристики сети 10 кВ и режимов работы ПЧ ТМЕІС, что делает возможным ее использование

при проведении дальнейших исследований. Результаты показали, что СПФ с указанными параметрами показывает аналогичный технический эффект по снижению коэффициента искажения напряжения K_U , по сравнению с СПФ, полученным на стадии расчета.

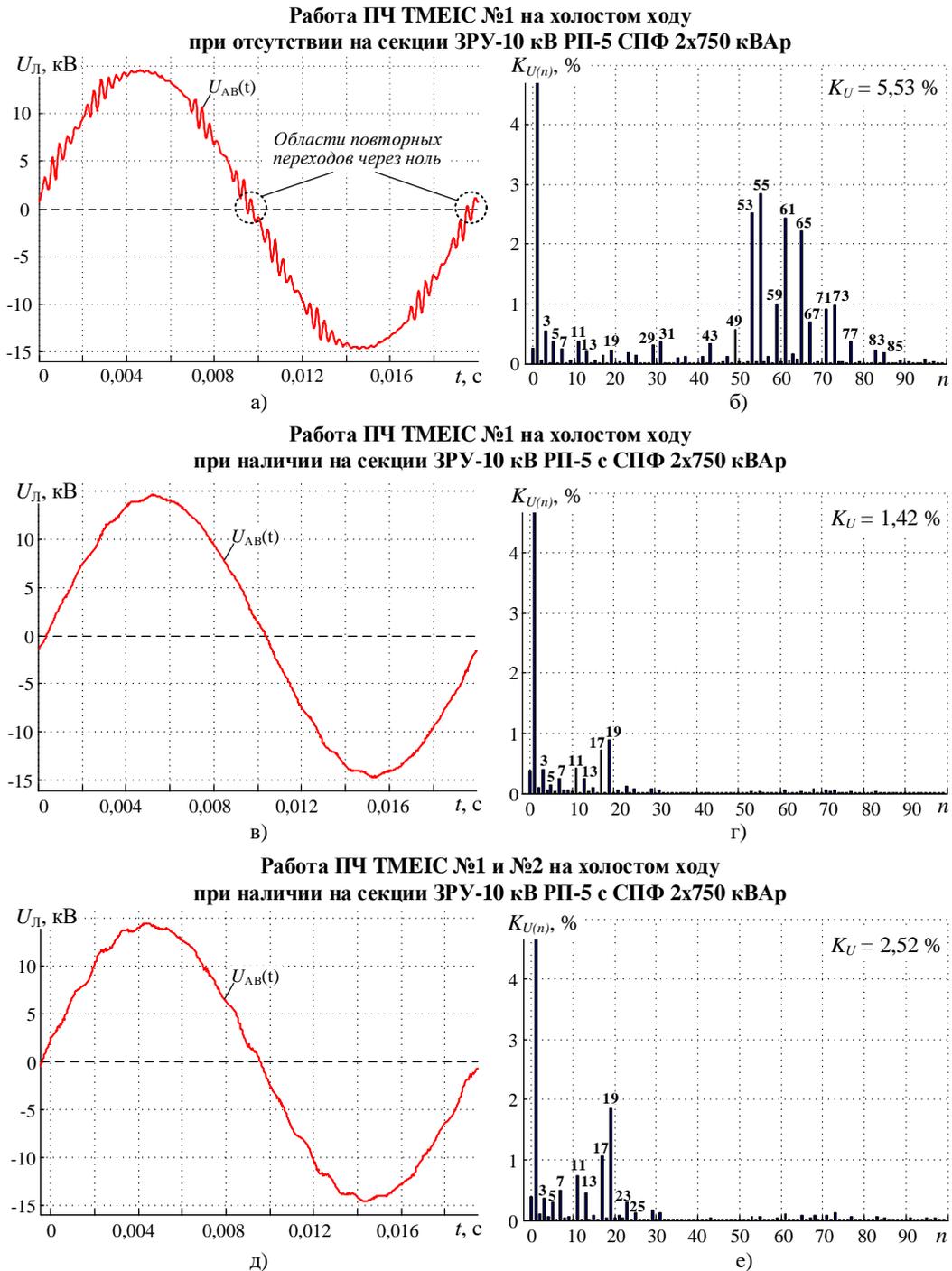
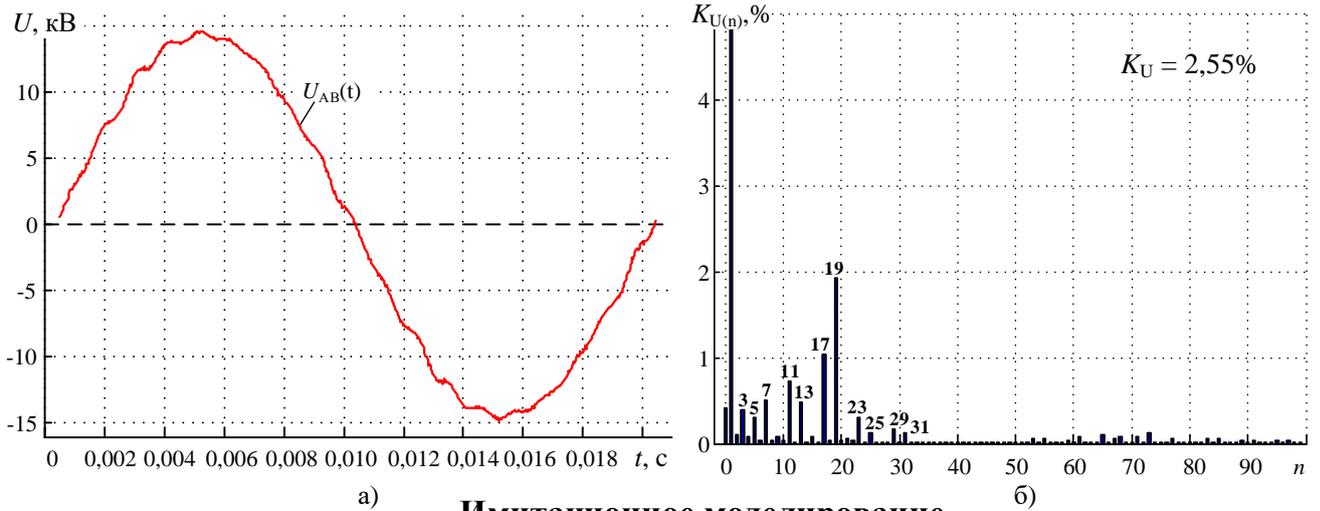


Рисунок 5.7 - Результаты экспериментальных исследований гармонического состава напряжения на секциях ЗРУ-10 кВ заводской ГПП при использовании разработанного СПФ №1,2 750 кВАр, установленного в РП-5 «Газоочистка»

Экспериментальные данные



Имитационное моделирование

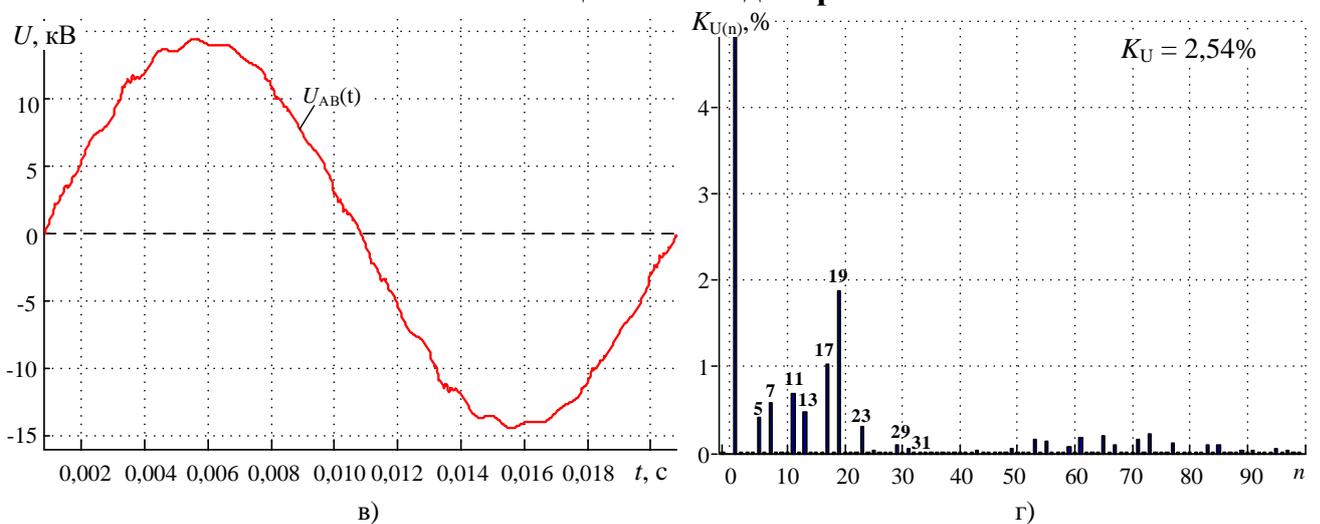


Рисунок 5.8 - Проверка адекватности разработанной имитационной модели с использованием результатов экспериментальных исследований эффективности коррекции частотной характеристики за счет СПФ установленных в распределительном пункте РП-5 «Газоочистка»

Проведены экспериментальные исследования с целью оценки эффективности применения СПФ в качестве корректора частотной характеристики и уменьшения коэффициента искажения напряжения K_U , для различных режимов работы электроприемников и двух возможных схем электроснабжения, подробно рассмотренных в главе 4 [115].

Рассмотрены режимы при раздельной работе секций ЗРУ-10 кВ ГПП.

В режиме 1.1 СПФ на РУ-10 кВ РП-5 отключен при работающих электроприводах DRM и включенных ПЧ ТМЕИС3 или ТМЕИС1,2 в РП-4 МЕСО1. В этом случае в частотных характеристиках сети 10 кВ, построенных

относительно секций №1 и №2, работающих отдельно, присутствуют сильные резонансы токов, частоты которых попадают в область генерирования высших гармоник преобразователей ТМЕИС. Это приводит к сильным искажениям напряжения на секции №2, от которой получает питание РП-4 МЕСО1. Осциллограмма мгновенных значений напряжения, соответствующая данному режиму приведена на рисунке 5.9. Видно, что гармонический состав напряжения близок к случаю, описанному во 2 главе, и равен $K_U = 10,26\%$, когда в ходе проведения экспериментальных исследований были зафиксированы резонансные явления. Эксплуатация ПЧ Siemens S120 в данных условиях опасна, т.к. может произойти нарушение последовательности открытия транзисторов в активном выпрямителе из-за влияния высокочастотных колебаний на систему синхронизации и при переходе модуля Smart в режим рекуперации энергии в сеть, что повлечет за собой выход из строя силовых модулей.

В режиме 1.2 (рисунок 5.10) в РП-5 включаются дополнительные СПФ мощностью 2×750 кВАр при работающих электроприводах DRM и включенных ПЧ-АВ ТМЕИС3 или ТМЕИС1,2 в РП-4 МЕСО1. В данном режиме имеет место смещение резонансов тока в низкочастотную область, за счет чего происходит уменьшение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения до $K_U = 2,9\%$.

В режиме 1.3 (рисунок 5.11) в РП-5 включаются дополнительные СПФ мощностью 2×750 кВАр при работающих электроприводах DRM и включенных ПЧ-АВ ТМЕИС3 или ТМЕИС1,2 и ФКУ №1,2, настроенные на 5 и 7 гармоники в РП-4 МЕСО1. Данный режим является наиболее оптимальным и обладает максимальным эффектом по снижению K_U , за счет использования ФКУ №1,2, которые позволяют несколько снизить величину K_U за счет минимизации содержания в напряжении 10 кВ 5 и 7 гармоник, вследствие чего коэффициент гармонических составляющих напряжения минимален и составляет $K_U = 2,7\%$.

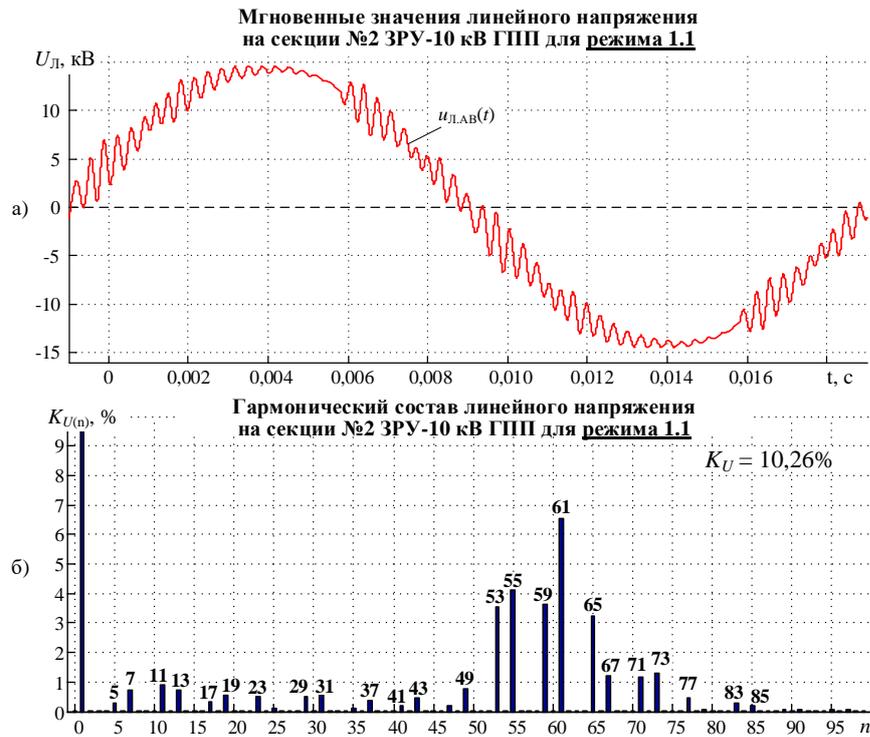


Рисунок 5.9 – Результаты экспериментальных исследований гармонического состава напряжения на секции №2 ЗРУ-10 кВ ГПП при использовании недопустимого режима 1.1 (при работающих электроприводах DRM и включенных ПЧ ТМЕІС3 или ТМЕІС1,2)

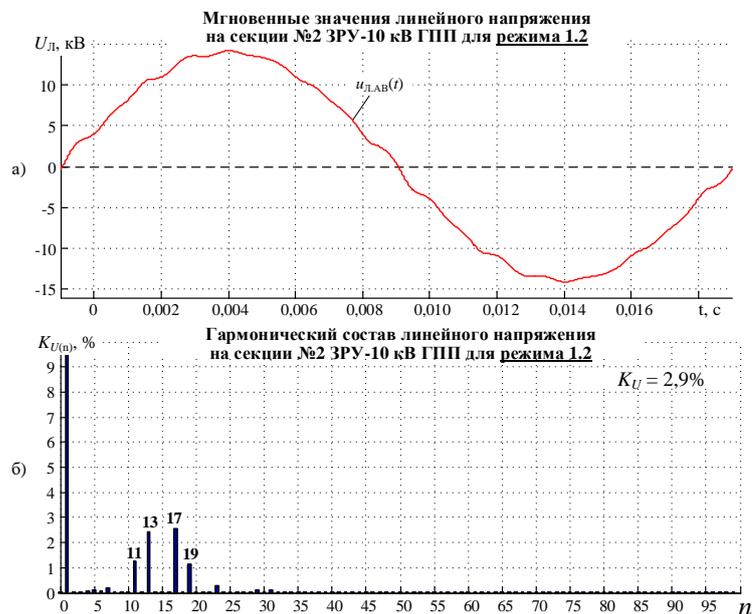


Рисунок 5.10 - Результаты экспериментальных исследований гармонического состава напряжения на секции №2 ЗРУ-10 кВ ГПП при использовании приемлемого режима 1.2 (при работающих электроприводах DRM и включенных ПЧ ТМЕІС3 или ТМЕІС1,2)

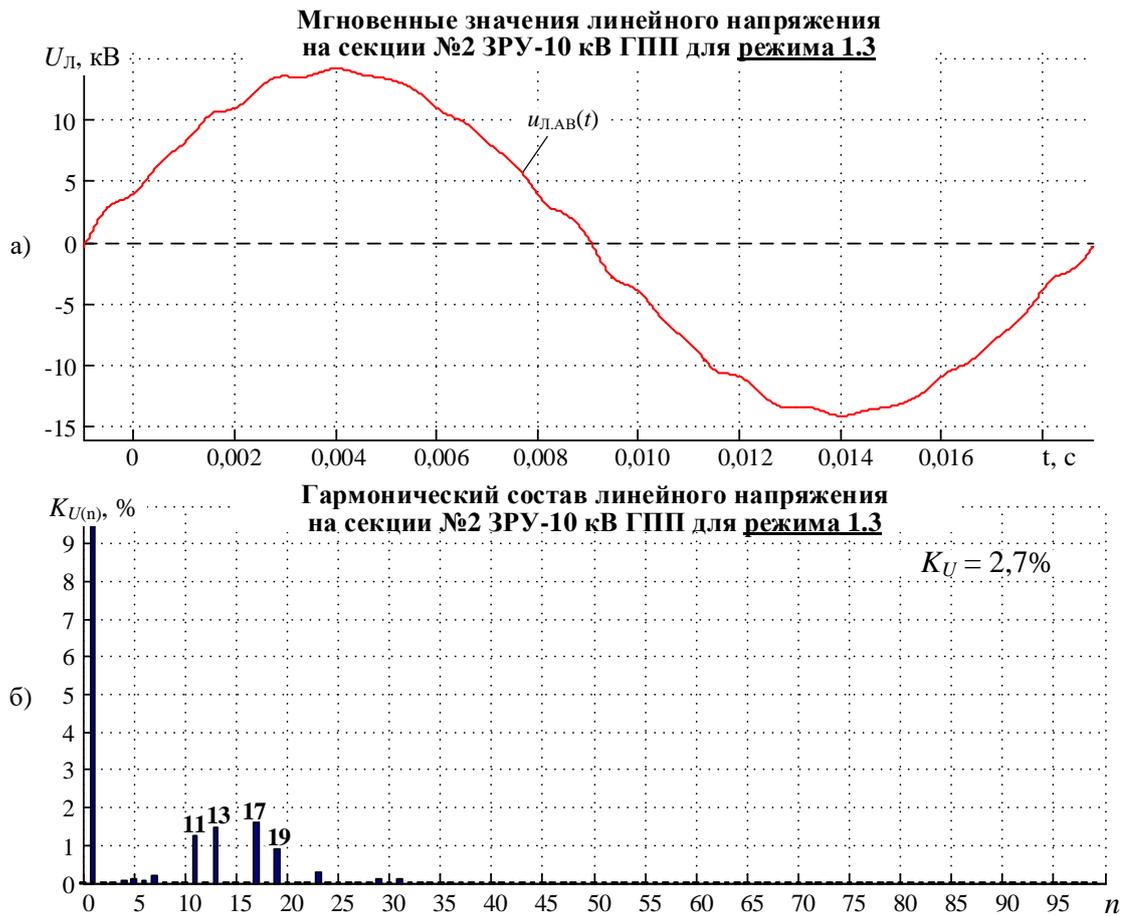


Рисунок 5.11 - Результаты экспериментальных исследований гармонического состава напряжения на секции №2 ЗРУ-10 кВ ГПП при использовании оптимального режима 1.3 (при работающих электроприводах DRM и включенных ПЧ ТМЕИС3 или ТМЕИС1,2)

Рассмотрены режимы при параллельной работе секций 1 и 2.

В режиме 2.1 (рисунок 5.12) дополнительные СПФ и ФКУ отключены. В этом случае наблюдается параллельный резонанс тока, как и в режиме 1.1 (рисунок 5.9), усиливающий высокочастотные гармоники ПЧ ТМЕИС1-3. Уровень искажений напряжения 10 кВ существенный (рисунок 5.12) и составляет $K_U = 6,53\%$.

В режиме 2.2 включение ФКУ1,2 в РП-4 без наличия дополнительных СПФ в РП-5 не даст положительного эффекта и вызовет усиление искажений из-за смещения резонанса токов вправо по шкале частот. Уровень искажений напряжения 10 кВ увеличится по сравнению с режимом 2.1 (рисунок 5.13) и составит $K_U = 7,8\%$.

В режиме 2.3 (рисунок. 5.14) в РП-5 включаются дополнительные СПФ мощностью 2×750 кВАр при работающих электроприводах DRM и включенных ПЧ-АВ ТМЕІС3 или ТМЕІС1,2 в РП-4 МЕСО1. В данном режиме имеет место смещение резонансов тока в низкочастотную область, за счет чего происходит уменьшение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения до $K_U = 2,33\%$.

В режиме 2.4 (рисунок. 5.15) в РП-5 включаются дополнительные СПФ мощностью 2×750 кВАр при работающих электроприводах DRM и включенных ПЧ-АВ ТМЕІС3 или ТМЕІС1,2 и ФКУ №1,2, настроенные на 5 и 7 гармоники в РП-4 МЕСО1. Данный режим является наиболее оптимальным и обладает максимальным эффектом по снижению K_U за счет использования ФКУ №1,2, которые позволяют несколько снизить величину K_U за счет минимизации содержания в напряжении 10 кВ 5 и 7 гармоник. Вследствие этого коэффициент гармонических составляющих напряжения минимален и составляет $K_U = 2,14\%$.

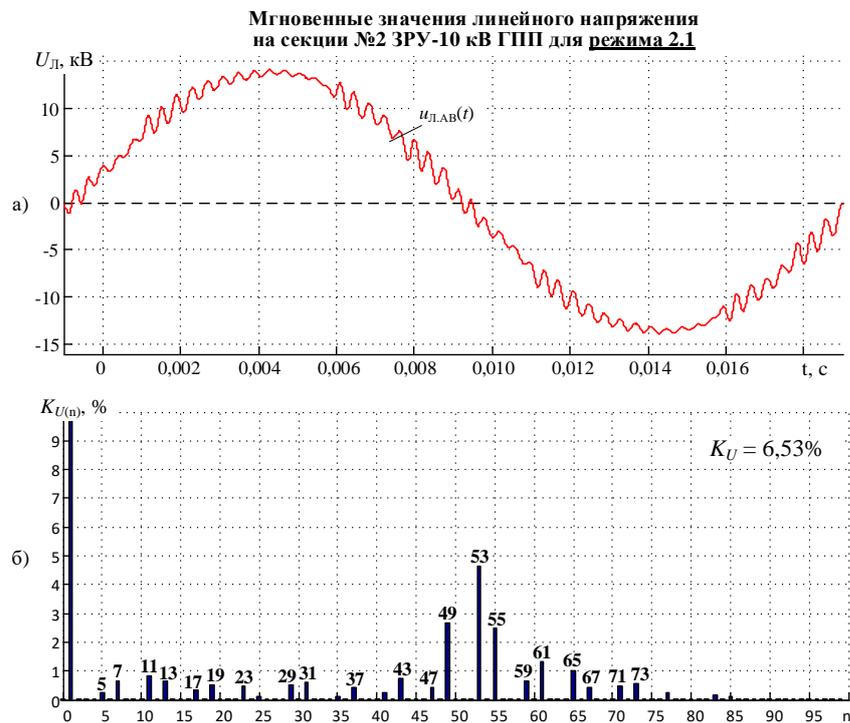


Рисунок 5.12 - Результаты экспериментальных исследований гармонического состава напряжения на секции №2 ЗРУ-10 кВ ГПП при использовании недопустимого режима 2.1 (при работающих электроприводах DRM и включенных ПЧ ТМЕІС3 или ТМЕІС1,2)

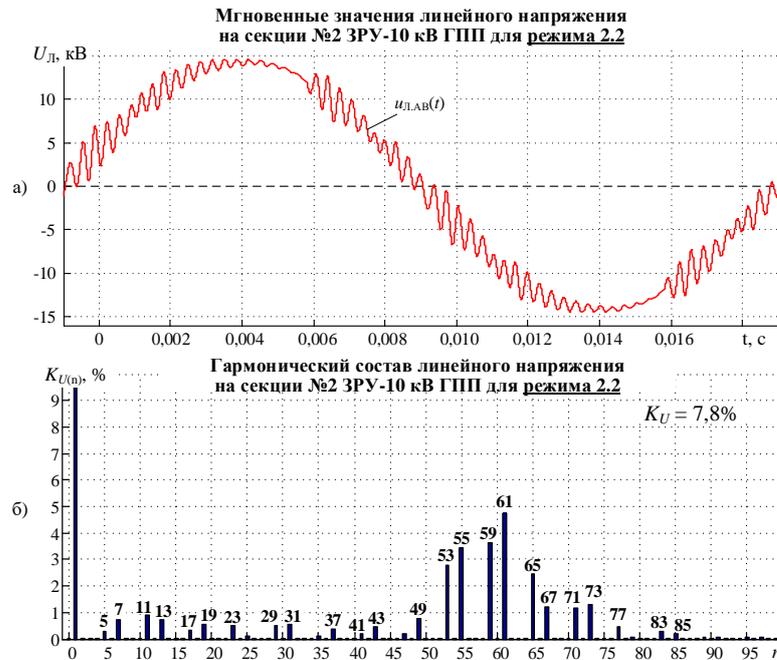


Рисунок 5.13 - Результаты экспериментальных исследований гармонического состава напряжения на секции №2 ЗРУ-10 кВ ГПП при использовании недопустимого режима 2.2 (при работающих электроприводах DRM и включенных ПЧ ТМЕИС3 или ТМЕИС1,2 и ФКУ 5 и 7 гармоники)

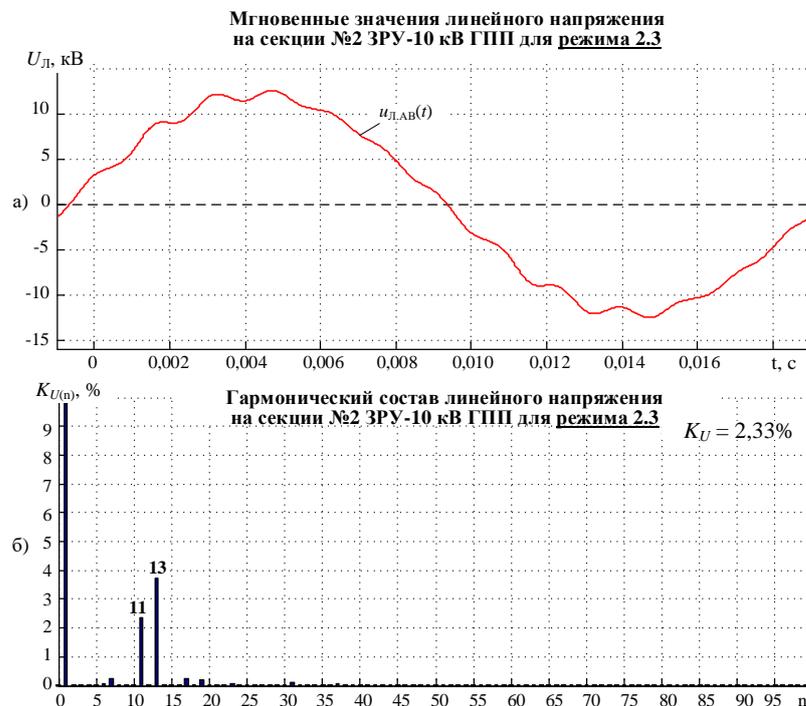


Рисунок 5.14 - Результаты экспериментальных исследований гармонического состава напряжения на секции №2 ЗРУ-10 кВ ГПП при использовании приемлемого режима 2.3 (при работающих электроприводах DRM и включенных ПЧ ТМЕИС3 или ТМЕИС1,2)

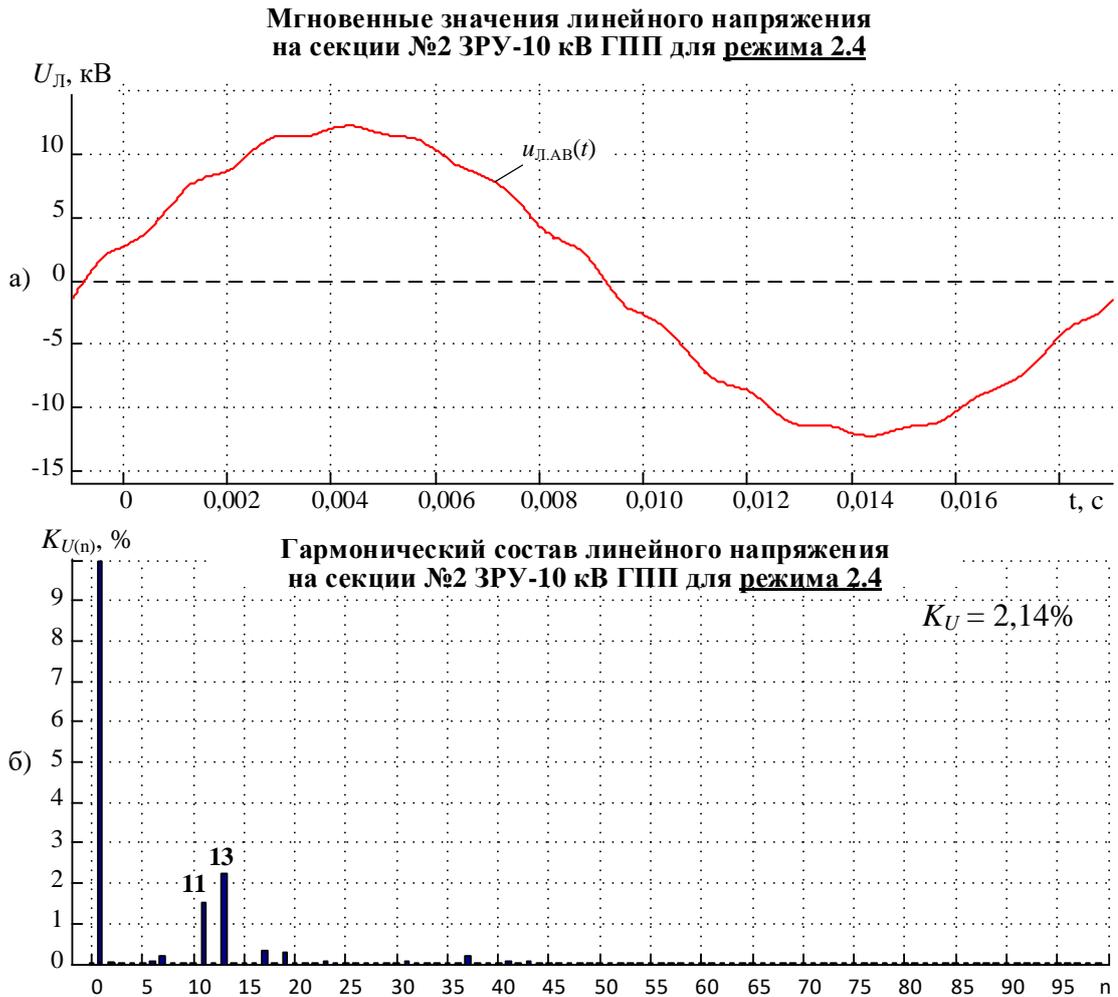


Рисунок 5.15 - Результаты экспериментальных исследований гармонического состава напряжения на секции №2 ЗРУ-10 кВ ГПП при использовании оптимального режима 2.4 (при работающих электроприводах DRM и включенных ПЧ ТМЕІС3 или ТМЕІС1,2)

Обобщенные результаты экспериментальной оценки изменения суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения K_U на секциях ЗРУ-10 кВ заводской ГПП приведены в таблице 5.4. Из результатов видно, что во всех режимах работы при включении дополнительных СПФ 2x750 кВАр изменение показателей коэффициента искажения напряжения составило δK_U более 70% относительно наихудших режимов работы без СПФ как для отдельной работы секций 1 и 2, так и при совместной. Наилучшие показатели $\delta K_U = -74,6\%$ и $\delta K_U = -72,6\%$ достигаются при работе СПФ, установленных в РП-5, совместно с ФКУ 5 и 7 гармоник, установленных в РП-4 МЕСО1.

Таблица 5.4 – Результаты сравнения значения показателей качества электрической энергии в точке общего присоединения электроприемников при использовании дополнительных СПФ 2х750 кВАр

Режимы работы СПФ 10 кВ при заданной конфигурации сети 10 кВ внутризаводской СЭС	Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения, K_U , %	Изменение δK_U , %, относительно наихудшего режима
Раздельная работа секций 1 и 2 ЗРУ-10 кВ заводской ГПП		
Режим 1.1. Все компенсирующие устройства ФКУ -10 кВ, имеющие связь с секциями №1 и №2 ЗРУ-10 кВ, отключены, включая СПФ на РП-5 «Газоочистка» (рисунок 5.9) .	10,26	
Режим 1.2. На РП-5 «Газоочистка» включены дополнительные СПФ 2х750 кВАр. (рисунок 5.10) .	2,9	-71,7 %
Режим 1.3. Секция 2: на РП-5 включен дополнительный СПФ 2х750 кВАр, на РП-4 МЕСО1 включены ФКУ 1,2 с фильтрами 5 и 7 гармоник (рисунок 5.11) .	2,7	-74,6%
Совместная работа секций 1 и 2 ЗРУ-10 кВ заводской ГПП		
Режим 2.1. Все компенсирующие устройства ФКУ -10 кВ, имеющие связь с секциями №№1-2 ЗРУ-10 кВ, отключены, включая СПФ на РП-5 «Газоочистка» (рисунок 5.12)	6,53	
Режим 2.2. Все компенсирующие устройства УКРМ - 10 кВ, имеющие связь с секциями №№1-2 ЗРУ-10 кВ, отключены, включая СПФ на РП-5. На РП-4 МЕСО1 включены ФКУ 1,2 (рисунок 5.13) .	7,8	+16,2%
Режим 2.3. Включены СПФ 2х750 кВАр в РП-5 «Газоочистка» (рисунок 5.14) .	2,33	-70,1%
Режим 2.4. Включены СПФ 2х750 кВАр в РП-5 и ФКУ 1,2 в РП-4 МЕСО1 (рисунок 5.15) .	2,14	-72,6%

Достигнутый уровень K_U достаточен для надежной работы параллельных электроприемников в виде групповых активных выпрямителей Siemens S120 и других чувствительных электроприемников, получающих питание от секций заводской ГПП, а именно: источники бесперебойного питания ИБП в серверных питающие промышленные, программируемые контроллеры, которые являются очень чувствительными к качеству электроэнергии, в частности к гармоническому составу напряжения.

Необходимо отметить, что после внедрения разработанных СПФ на металлургическом предприятии АО «Металлургический завод Балаково» массовые выходы из строя групповых активных выпрямителей Siemens S120 прекратились. Статистика отказов работы значительно улучшилась.

По результатам диссертационной работы был составлен соответствующий акт внедрения, приложение В.

5.3 Выводы по главе

1. В новой конфигурации электрической сети 10 кВ, где секции ЗРУ-10 кВ работают параллельно, СПФ 2x750 кВАр в составе РП-5 «Газоочистка» за счет значительной емкости при малой индуктивности воздушного реактора обеспечивает коррекцию частотной характеристики сети за счет смещения опасного параллельного резонанса токов в безопасную область, где отсутствуют высокочастотные гармоники ПЧ-АВ ТМЕИС. В результате этого работа силовых преобразователей ТМЕИС уже не оказывает негативного влияния на гармонический состав напряжения на общих секциях заводской ЗРУ-10 кВ ГПП и других РУ-10 кВ цеховых РП.

2. Экспериментальные исследования гармонического состава напряжения на секциях ЗРУ-10 кВ ГПП, а также в других точках внутризаводской распределительной сети, доказали эффективность применения СПФ. В частности, было определено, что при использовании конфигурации электроснабжения с отдельной работой секций №1 и №2 ЗРУ-10 кВ с питанием от двух трансформаторов Т1 и Т2 220/10 кВ и установкой в РП-5 двух дополнительных СПФ 2x750 кВАр достигается оптимальная величина коэффициента суммарных

искажений напряжения $K_U = 2,9\%$. Наилучшая форма линейного напряжения и наименьшее значение коэффициента суммарного искажения напряжения $K_U = 2,7\%$ имеет место при включении двух ФКУ 5 и 7 гармоники на РП-4 МЕСО1 параллельно СПФ 2х750 кВАр. При использовании второй конфигурации электроснабжения с параллельной работой секций №1 и №2 и включением в РП-5 двух СПФ 2х750 кВАр достигается приемлемый коэффициент суммарного искажения напряжения $K_U = 2,33\%$. Наилучшая форма линейного напряжения и наименьшее значение коэффициента суммарного искажения напряжения $K_U = 2,14\%$ имеют место при включении двух ФКУ 5 и 7 гармоники на РП-4 МЕСО1 параллельно СПФ 2х750 кВАр. В данных случаях технический эффект при работе дополнительных СПФ составляет 70,1-74,6 % в зависимости от режимов работы и конфигураций схемы электроснабжения.

3. Существующие ФКУ в РП-4 МЕСО1 (фильтры 5 и 7 гармоник) в режиме отсутствия резонанса высокочастотной области вносят положительный эффект в уменьшение коэффициента суммарных искажений напряжения и могут быть включены в работу совместно с СПФ 2х750 кВАр, расположенными в РП-5, для достижения максимального технического эффекта. При наличии резонансных явлений ФКУ оказывают негативный эффект и усиливают искажения. Таким образом, при отключенных СПФ в РП-5 использование ФКУ не является целесообразным.

4. Статистический анализ количества выходов из строя ПЧ Siemens показал, что при использовании новой схемы электроснабжения с параллельной работой секций 1 и 2 ЗРУ-10 кВ, благодаря наличию СПФ на РП-5, количество аварийных ситуаций значительно снизилось, а именно: 1) были полностью исключены выходы из строя групповых выпрямителей Siemens S120 из-за ухудшения качества напряжения на секциях РУ-10 кВ РП-4 МЕСО1, 2) снизилось количество аварийных отключений других чувствительных электроприемников, таких как: источники бесперебойного питания ИБП в серверных, питающих промышленные программируемые контроллеры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен сравнительный анализ структур систем электроснабжения электроприемников 10 кВ компактных и крупных металлургических предприятий с протяженными кабельными линиями электропередач. Исследованы причины возникновения резонансных явлений в сети 10 кВ при работе мощных электроприводов скоростных проволочных блоков сортового стана. Исследован гармонический состав токов и напряжений ПЧ-АВ при использовании различных силовых схем и разных алгоритмов ШИМ АВ.

2. Проведены экспериментальные исследования показателей качества электроэнергии в промышленных электрических сетях с мощными электроприводами на базе ПЧ-АВ на примере АО «Металлургический завод Балаково». Выявлены резонансы, высокочастотные составляющие сетевого тока ПЧ-АВ.

3. Разработан новый способ обеспечения ЭМС, подразумевающий использование специализированного корректирующего фильтра, обеспечивающего изменение частотной характеристики питающей сети и сдвиг опасных резонансов в безопасную зону, где отсутствуют значимые гармоники, генерируемые АВ.

4. Разработана комплексная математическая модель системы внутризаводского электроснабжения металлургического завода и ПЧ-АВ для исследования эффективности применения СПФ, отличающаяся от известных тем, что позволяет выполнять анализ режимов работы СПФ.

5. Разработана новая методика расчета параметров специализированного пассивного фильтра, включающая в себя: 1) составление имитационной модели системы внутризаводского электроснабжения и модели ПЧ-АВ; 2) определение оптимальной мощности корректирующего фильтра с использованием оптимального критерия – минимальное значение суммарного коэффициента гармонического составляющего напряжения K_U , рассчитанного до 150 гармоники на общих секциях ГПП; 3) при выбранной мощности СПФ должна

обеспечиваться минимальная величина суммарного коэффициента гармонических составляющих тока K_I , не превышающая 45% для возможности эксплуатации конденсаторов с пленочным полипропиленовым диэлектриком; 4) проводится дополнительная проверка на возникновение недопустимых уровней бросков тока и напряжений при подаче напряжения на СПФ.

6. Внедрение СПФ на АО «Металлургический завод Балаково» показало эффективность предложенной методики. В случае действующего производства уменьшение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжений K_U составило в абсолютном отношении $\delta K_U = 70,1-74,6\%$ в зависимости от режимов работы и конфигураций схемы электроснабжения. Применение СПФ позволило обеспечить нормальную работу других чувствительных электроприемников, получающих питание от общей секции ГПП 10 кВ.

7. Разработанный способ обеспечения ЭМС ПЧ-АВ с питающей сетью 6-35 кВ за счет применения СПФ рекомендован для расширенного применения на компактных металлургических предприятиях в прокатных и электросталеплавильных комплексах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Николаев, А.А. Разработка научно-обоснованных технических решений по обеспечению электромагнитной совместимости мощных промышленных электроприводов с питающей сетью: монография / Николаев А.А., Буланов М.В., Гилемов И.Г., **Афанасьев М.Ю.**, Шахбиева К.А., Лаптова В.А. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, – 2021. – 330 с.
2. Храмшин, Т.Р. Исследование воздействия активных выпрямителей большой мощности на питающую сеть / Т.Р. Храмшин, Г.П. Корнилов, А.А. Николаев и др. // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2013. – №1. – С. 80-83.
3. Endrejat, F. Resonance Overvoltages in Medium Voltage Multilevel Drive System / F. Endrejat, P. Pillay // 2007 IEEE International Electric Machines & Drives Conference – Antalya. – 2007. - P. 736-741.
4. Alawasa, K.M. Active Mitigation of Subsynchronous Interactions Between PWM Voltage-Source Converters and Power Networks / K. M. Alawasa, Y. A. R. I. Moamed and W. Xu// IEEE Transactions on Power Electronics – 2014. - vol. 29, no. 1 - P. 121-134.
5. Николаев, А.А. Экспериментальные исследования электромагнитной совместимости современных электроприводов в системе электроснабжения металлургического предприятия / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, Т.Р. Храмшин, Г. Никифоров, Ф.Ф. Муталлапова // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова – 2016. – Т. 14, №4 – С. 96-105.
6. Храмшин, Т.Р. Обеспечение электромагнитной совместимости мощных электротехнических комплексов / Т.Р. Храмшин, И.Р. Абдулвелеев, Г.П. Корнилов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». - 2015. - Т. 15, № 1. - С. 82-93.
7. Dong, J. Study of conducted EMI reduction for three- phase active front-end rectifier / J. Dong, L. Rixin, W. Fei, L. Fang, W. Shuo, D. Boroyevich // IEEE Trans. Power Electron – 2011. - vol. 26, no. 12 - P. 3823-3831.

8. Blooming, T.M. Application of IEEE STD 519-1992 Harmonic Limits / T.M. Blooming, D.J. Carnovale // Conference Record of 2006 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference - Appleton, WI, 2006. - P. 1-9.

9. Крюков, О.В. Сравнение характеристик высоковольтных преобразователей частоты электроприводов / О.В. Крюков // Электротехника: сетевой электронный научный журнал - 2016. - Т. 3, № 2 - С. 50-56.

10. Miskovic, V. Observer based active damping of LCL resonance in grid connected voltage source converters / V. Miskovic, V. Blasko, T. Jahns, A. Smith and C. Romenesko // 2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition - Denver, CO. – 2013. - P. 4850-4856.

11. Зиновьев, Г.С. Улучшение электромагнитной совместимости выпрямителей трехфазного тока и питающей сетью / Г.С. Зиновьев // Электрическое питание. – 2001. – С. 19–22.

12. Li, X. Damped high passive filter – a new filtering scheme for multipulse rectifier systems / X. Li, W. Xu, T. Ding // IEEE transactions on power delivery. – 2017. - vol. 32, no. 1. - P. 117–124.

13. Карташев, И.И. Управление качеством электроэнергии / И.И. Карташев, В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонов, Ю.В. Шаров, А.Ю. Воробьев – М.: Издательский дом МЭИ, 2006 – 320 с.

14. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014. –19 с

15. Николаев, А.А. Обеспечение эффективного функционирования мощных промышленных электроприводов на базе преобразователей частоты с активными выпрямителями: монография / Николаев А.А., Буланов М.В., Гилемов И.Г., **Афанасьев М.Ю.**, Ивекеев В.С., Денисевич А.С. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2022. – 396 с. – ISBN 978-5-9967-2622-6.

16. Николаев, А.А. Разработка и исследование усовершенствованного алгоритма ШИМ активного выпрямителя с изменяемыми таблицами углов

переключения / А. А. Николаев, И. Г. Гилемов // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2020. – № 6. – С. 48–56.

17. Maklakov, A.S. Grid Connection Circuits for Powerful Regenerative Electric Drives of Rolling Mills: Review / Maklakov A.S., Jing, T., Nikolaev, A.A., Gasiyarov, V.R // *Energies* 2022, 15(22), 8608

18. Rodriguez, J. R. Resonances in a high-power active-front-end rectifier system / J. R. Rodriguez, J. Pontt, R. Huerta, G. Alzamora, N. Becker, S. Kouro, P. Cortes, P. Lezana // *IEEE Trans. Ind. Electron* – 2005. - vol. 52, no. 2 - P. 482-488.

19. O'Brien, K. Active rectifier for medium voltage drive systems / K. O'Brien, R. Teichmann, S. Bernet // *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2001. APEC 2001. Sixteenth Annual IEEE - Anaheim, CA, - 2001. - vol. 1. - P. 557-562.*

20. Yuquan, M. Calculation of the Filter Parameters for the Aluminum Electrolyzation Rectifier / M. Yuquan, Z. Lihong, H. Shufen // *Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA), 2010 International Conference on - Changsha, China. – 2010. - P. 906-910.*

21. Chaladying, S. Parallel resonance impact on power factor improvement in power system with harmonic distortion / S. Chaladying, A. Charlangsut, N. Rugthaichareoncheep // *TENCON 2015 - 2015 IEEE Region 10 Conference – Macao. – 2015. - P. 1-5.*

22. Pontt, J. Resonance mitigation and dynamical behavior of systems with harmonic filters for improving reliability in mining plants/ J. Pontt, J. Rodriguez, J. S. Martin, R. Aguilera, R. Bernal, P. Newman // *Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting - Tampa, FL – 2006. - P. 1298-1302.*

23. Siebert, A. AC to DC power conversion now and in the future / A. Siebert, Troederson, S. Ebner, // *IEEE Transactions on Industry Applications. – 2002. - no. 38. - P. 934-940.*

24. Брованов, С.В. Методика расчета энергетических показателей качества преобразования энергии в трехуровневом инверторе напряжения / С.В. Брованов // *Научный вестник НГТУ. – 2009. – №3(36). – С. 131–142.*

25. Moeini, A. A current reference based selective harmonic current mitigation pwm technique to improve the performance of cascaded H-bridge multilevel active rectifiers / A. Moeini, H. Zhao, S. Wang // IEEE Trans. Ind. Electronics. – 2018. - vol. 65. - P. 727-737.

26. Буланов, М. В. Обеспечение электромагнитной совместимости мощных электроприводов с активными выпрямителями в системах электроснабжения при наличии резонансных явлений: дис. ...кан. техн. наук / Буланов М. В. – Магнитогорск, 2022. – 152 с.

27. Буланов, М. В. Обеспечение электромагнитной совместимости мощных электроприводов с активными выпрямителями в системах электроснабжения при наличии резонансных явлений: специальность 05.09.03 "Электротехнические комплексы и системы»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Буланов Михаил Викторович. – Магнитогорск, 2022. – 20 с.

28. Гилемов, И. Г. Повышение качества электроэнергии во внутризаводских распределительных сетях за счет усовершенствованных систем управления активных выпрямителей: дис. ...кан. техн. наук / Гилемов И. Г. – Магнитогорск, 2023. – 160 с.

29. Гилемов, И. Г. Повышение качества электроэнергии во внутризаводских распределительных сетях за счет усовершенствованных систем управления активных выпрямителей: специальность 05.09.03 "Электротехнические комплексы и системы»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Гилемов Ильдар Галиевич. – Магнитогорск, 2023. – 20 с.

30. Николаев, А.А. Исследование параллельной работы автоматизированных электроприводов прокатного стана и дуговой сталеплавильной печи / А.А. Николаев, А.С. Денисевич, М.В. Буланов // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2017. – Вып. 3. – С. 59–69.

31. Храмшин, Т.Р. Оценка методов широтно-импульсной модуляции напряжения активных выпрямителей прокатных станов / Т.Р. Храмшин, Д.С.

Крубцов, Г.П. Корнилов // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2013. – № 2. – С. 48–52.

32. Николаев, А.А., Исследование резонансных явлений в распределительных электрических сетях среднего напряжения систем внутризаводского электроснабжения промышленных предприятий / А. А. Николаев, Т. Р. Храмшин, М. Ю. Афанасьев. // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. - 2017. - № 4. - С. 51-62, doi: 10.24892/RIJE/20170401

33. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014. – 19 с.

34. Маклаков, А.С. Анализ работы активного выпрямителя напряжения в режимах компенсации реактивной мощности / А.С. Маклаков // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2013. – № 1. – С. 43–50.

35. Tianyu, D. Design method for 3rd order high-pass filter / D. Tianyu, X. Wilsun, H. Liang // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2015. – P. 402-403.

36. Dovgun, V. High-pass harmonic filters: general properties and design procedure / V. Dovgun, D. Egorov, V. Novikov // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – 2019. – art. no. 8743078

37. Маклаков, А.С. Имитационное моделирование главного электропривода прокатной клетки толстолистового стана 5000 / А.С. Маклаков // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2014. – № 3. – С. 16–25.

38. Маклаков, А.С. Энергосберегающий электропривод на базе двухзвенного преобразователя частоты с активным выпрямителем и автономным инвертором напряжения / А.С. Маклаков, В.Р. Гасияров, А.В. Белый // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2014. – Т. 1, № 1. – С. 23–30.

39. Николаев, А.А. Обеспечение электромагнитной совместимости мощных электроприводов прокатных станов на базе ПЧ-АВ при наличии резонансных явлений в распределительных сетях среднего напряжения / А.А. Николаев, М.В.

Буланов, М.Ю. Афанасьев, К.А. Шахбиева // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. Тезисы докладов 77-й междунауч.-технич. конф. - 2019. - С. 276.

40. Николаев, А.А. Разработка усовершенствованного алгоритма ШИМ активного выпрямителя с адаптацией к резонансным явлениям во внутризаводской сети / А.А. Николаев, М.В. Буланов, **М.Ю. Афанасьев**, А.С. Денисевич // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2018. – № 6. – С. 47-56. – DOI 10.17588/2072-2672.2018.6.047-056.

41. "IEEE Guide for the Application and Specification of Harmonic Filters - Redline," in IEEE Std 1531-2020 (Revision of IEEE Std 1531-2003) - Redline, vol., no., pp.1-127, 26 Jan. 2021.

42. Anuar, M. N. K. Dominant Harmonic Current Reduction using Passive Power Filter / M. N. K. Anuar, N. Abdullah // 2022 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon), Langkawi, Kedah, Malaysia, 2022, pp. 186-191.

43. Tischer, H. Hybrid filter for dynamic harmonics filtering and reduction of commutation notches - a case study / H. Tischer, T. Pfeifer // 2016 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Belo Horizonte, Brazil, 2016, pp. 261-265.

44. Gumilar, L. Interline Feeder of Shunt Passive Harmonic Filter and Detuned Reactor to Reduce Harmonic Distortion / Gumilar, M. Sholeh, W. Sapto Nugroho // 2021 4th International Seminar on Research of Information Technology and Intelligent Systems (ISRITI), Yogyakarta, Indonesia, 2021, pp. 417-422.

45. Barros, J. A New Harmonic Extraction Method for Estimation of the Reference Compensation Current in Shunt Active Power Filters / J. Barros, M. de Apráiz, R. I. Diego // 2022 20th International Conference on Harmonics & Quality of Power (ICHQP), Naples, Italy, 2022, pp. 1-6.

46. Parthasarathy, S. A harmonic distortion analysis of power distribution systems with hybrid power filter / S. Parthasarathy, S. C. Kanakavel, S. A. Karthickkumar // 2016 International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT), Nagercoil, India, 2016, pp. 1-11.

47. Peter, A. G. Comparative study of harmonics reduction and power factor enhancement of six and 12-pulses HVDC system using passive and shunt APFs harmonic filters / A. G. Peter, K. A. Saha // 2018 International Conference on the Domestic Use of Energy (DUE), Cape Town, South Africa, 2018, pp. 1-10.

48. Kihwele, S. Modelling of Shunt Active Power Filter for Harmonics Case Study of Steel Industry / S. Kihwele // 2019 International Conference on Electronics, Information, and Communication (ICEIC), Auckland, New Zealand, 2019, pp. 1-2.

49. Antunes, H. M. A. Connection of a series hybrid filter in isolated microgrid for harmonic compensation / H. M. A. Antunes, S. M. Silva, B. d. J. C. Filho, R. V. Ferreira, T. M. G. Costa // 2016 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Belo Horizonte, Brazil, 2016, pp. 24-29.

50. Li, X. Damped high passive filter — a new filtering scheme for multipulse rectifier systems / X. Li, W. Xu and T. Ding // 2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Chicago, IL, USA, 2017, pp. 1-1.

51. Kamat, P. R. Performance Evaluation of Butterworth, Chebyshev, and Elliptic filter for Harmonic Mitigation using P-Q based SAPF / P. R. Kamat, A. J. Naik // 2022 International Conference on Smart Generation Computing, Communication and Networking (SMART GENCON), Bangalore, India, 2022, pp. 1-5.

52. Hrubý, T. Using broadband passive harmonic filters for harmonic mitigation in AC drives / T. Hrubý, S. Kocman // 2014 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Bucharest, Romania, 2014, pp. 172-176.

53. Aswal, J. Harmonic Mitigation in a 3-Phase, 3-Wire System Using Hybrid Filter / J. Aswal, Y. Pal // 2018 2nd International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI), Tirunelveli, India, 2018, pp. 743-746.

54. Bernet, D. Integrating Voltage-Source Active Filters into Diode Front-End Rectifiers – Harmonic Mitigation and Power Factor Correction / D. Bernet, M. Hiller // 2021 23rd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'21 ECCE Europe), Ghent, Belgium, 2021, pp. P.1-P.9.

55. Pradika Napitupulu, H. Y. HFMS: Soft for Calculating and Simulating Harmonics Distortion and Passive Filters / H. Y. Pradika Napitupulu, C. Gagarin Irianto

// 2018 International Conference on Computer, Control, Informatics and its Applications (IC3INA), Tangerang, Indonesia, 2018, pp. 28-33.

56. Rajeshwari. Voltage harmonic reduction using passive filter shunt passive-active filters for non-linear load / Rajeshwari, A. Bagwari // 2017 7th International Conference on Communication Systems and Network Technologies (CSNT), Nagpur, India, 2017, pp. 131-136.

57. Amoroso, M. M. Project of a power filter in the configuration shunt series to mitigate the harmonics in a TPP / M. M. Amoroso, M. O. Oliveira, J. H. Reversat, O. H. Ando 2016 // 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Belo Horizonte, Brazil, 2016, pp. 804-809.

58. Esposito, G. Impact of harmonic filters in MV distribution systems / G. Esposito, F. Foadelli, M. Roscia // Proceedings of 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power - ICHQP 2010, Bergamo, Italy, 2010, pp. 1-4.

59. Rahmani, S. A Combination of Shunt Hybrid Power Filter and Thyristor-Controlled Reactor for Power Quality / S. Rahmani, A. Hamadi, K. Al-Haddad, L. A. Dessaint // in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 61, no. 5, pp. 2152-2164, May 2014.

60. Peterson, B. Tracking harmonic filter performance using aggregated harmonic phasors / B. Peterson, J. Rens, J. Meyer, S. Rens // 2022 IEEE 12th International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS), Cagliari, Italy, 2022, pp. 1-6.

61. Aswal, J. Passive and active filter for harmonic mitigation in a 3-phase, 3-wire system / J. Aswal, Y. Pal // 2018 2nd International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC), Coimbatore, India, 2018, pp. 668-672.

62. Czarnecki, L. S. The effect of the design method on efficiency of resonant harmonic filters / L. S. Czarnecki, H. L. Ginn // in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 20, no. 1, pp. 286-291, Jan. 2005.

63. Gumilar, L. Harmonic Mitigation Using Shunt Hybrid Power Filter in Departement of Electrical Engineering Universitas Negeri Malang Electrical Power System / L. Gumilar, M. A. Habibi, D. Prihanto, H. Wicaksono, A. Gunawan, J. R.

Larasati // 2019 International Conference on Information and Communications Technology (ICOIACT), Yogyakarta, Indonesia, 2019, pp. 761-766.

64. Gumilar, L. Performance Shunt Hybrid Power Filter and Line Reactor Methode for Harmonic Mitigation in 5 Dominant Order IHD-V / L. Gumilar, A. Kusumawardana, M. Afnan Habibi, A. Nur Afandi, D. Prihanto, A. Fahrul Aji // 2019 International Seminar on Application for Technology of Information and Communication (iSemantic), Semarang, Indonesia, 2019, pp. 377-382

65. Chmielewski, T. Comb filters for harmonics control in grid connected power electronic converters applications / T. Chmielewski // 2017 19th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'17 ECCE Europe), Warsaw, Poland, 2017, pp. P.1-P.10.

66. Zobaa, A. F. A New Approach for Harmonic Distortion Minimization in Power Systems Supplying Nonlinear Loads / A. F. Zobaa, S. H. E. Abdel Aleem // in IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 10, no. 2, pp. 1401-1412, May 2014.

67. Misra, B. Performance Analysis of Passive Harmonic Filters in HVDC Transmission System / B. Misra, P. Tripathy, S. Sahu // 2021 IEEE 2nd International Conference on Applied Electromagnetics, Signal Processing, & Communication (AESPC), Bhubaneswar, India, 2021, pp. 1-6.

68. Ullah, A. Digital Active Power Filter Controller Design for Current Harmonics in Power System / A. Ullah, I. U. H. Sheikh, S. Arshad, F. Saleem // 2019 16th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST), Islamabad, Pakistan, 2019, pp. 384-388.

69. Sabarimuthu, M. Reduction of Harmonics on Source Side Using Filters for EV Charging Applications / M. Sabarimuthu, M. Arun Kumar, R. Vennila, P. Muhamad Juhair, B. Johitha, M. Piranav // 2022 3rd International Conference for Emerging Technology (INCET), Belgaum, India, 2022, pp. 1-6.

70. Hu, H. Passive Filter Design for China High-Speed Railway With Considering Harmonic Resonance and Characteristic Harmonics / H. Hu, Z. He, S. Gao // in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 30, no. 1, pp. 505-514, Feb. 2015.

71. Jadhav, P. P. Reduce harmonics using PI controller in d-q reference frame for active power filter / P. P. Jadhav, A. S. Patil // 2016 International Conference on Global Trends in Signal Processing, Information Computing and Communication (ICGTSPICCC), Jalgaon, India, 2016, pp. 653-656.

72. Gonuguntala, V. K. Performance analysis of finite control set model predictive controlled active harmonic filter / V. K. Gonuguntala, A. Fröbel, R. Vick // 2018 18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Ljubljana, Slovenia, 2018, pp. 1-6

73. Xu, Y. Optimal configuration of filters for harmonic suppression in microgrid / Y. Xu, Y. Tang, W. Hong // 2014 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Bucharest, Romania, 2014, pp. 561-565.

74. Husnayain, F. Harmonics mitigation for offshore platform using active filter and line reactor methods / F. Husnayain, N. D. Purnomo, R. Anwar, I. Garniwa // 2014 International Conference on Electrical Engineering and Computer Science (ICEECS), Kuta, Bali, Indonesia, 2014, pp. 331-336.

75. Dovgun, V. High-Pass Harmonic Filters: General Properties and Design Procedure / V. Dovgun, D. Egorov, V. Novikov // 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russia, 2019, pp. 1-4.

76. Temerbaev, S. A. Improvement of power quality in distributed generation systems using hybrid power filters / S. A. Temerbaev, V. P. Dovgun // 2014 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Bucharest, Romania, 2014, pp. 694-698.

77. Jagiela, K. Influence of Harmonic Filters on the Operation of AC Arc Furnace Power Installation / K. Jagiela, M. Gala, M. Kopinski, J. Rak // 2018 Conference on Electrotechnology: Processes, Models, Control and Computer Science (EPMCCS), Kielce, Poland, 2018, pp. 1-5.

78. Tanitteerapan, T. Design of Experimental Learning Module on Passive Harmonic Filter for Variable Speed Drive / T. Tanitteerapan, S. Lakham // 2019 IEEE

6th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA), Tokyo, Japan, 2019, pp. 33-36.

79. Álvarez, J. J. P. Optimization of passive filtering systems used for mitigating harmonics in distribution networks / J. J. P. Álvarez, L. C. O. de Oliveira, J. B. de Souza, R. F. Buzo, R. R. A. Fortes // 2016 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Belo Horizonte, Brazil, 2016, pp. 437-442.

80. Shi, Q. Passive filter installation for harmonic mitigation in residential distribution systems / Q. Shi, H. Liang, T. Hou, L. Bai, W. Xu and F. Li // 2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Chicago, IL, USA, 2017, pp. 1-5.

81. Nassif, A. B. Passive Harmonic Filters for Medium-Voltage Industrial Systems: Practical Considerations and Topology Analysis / A. B. Nassif, W. Xu // 2007 39th North American Power Symposium, Las Cruces, NM, USA, 2007, pp. 301-307.

82. Yang, S. First harmonic suppression of a bandpass filter with an Optimum Bandstop Filter / S. Yang, J. Crutcher, B. Ellis, D. Nesby, W. Mccaa // IEEE SOUTHEASTCON 2014, Lexington, KY, USA, 2014, pp. 1-2.

83. Bacon, V. D. Selective harmonic currents suppressing applied to a three-phase shunt active power filter based on adaptive filters / V. D. Bacon, S. A. O. da Silva // 2015 IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC), Fortaleza, Brazil, 2015, pp. 1-6.

84. Trelles-Molina, D. Harmonic Filtering Scheme Selection Based on Diagnosis with Independent Component Analysis / D. Trelles-Molina, D. A. Ortuño-Gonzalez, R. A. Rosado-Romero, E. Fernandez-Medina, A. Berrueto-Garza // 2021 IEEE International Power and Renewable Energy Conference (IPRECON), Kollam, India, 2021, pp. 1-6.

85. Chang, G. W. A study of passive harmonic filter planning for an AC microgrid / G. W. Chang et al. // 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Denver, CO, USA, 2015, pp. 1-4.

86. Ramos, R. Optimal harmonic filter topology applied in HV and EHV networks using particle swarm optimization / R. Ramos, G. A. Franklin // 2016 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC), Ottawa, ON, Canada, 2016, pp. 1-6.

87. Shudarek, T. Harmonic filter topologies for low DC bus capacitance of 6-pulse rectifier front end adjustable speed drives / T. Shudarek, T. Luu // 2018 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), San Antonio, TX, USA, 2018, pp. 2315-2322.

88. Prasad, H. Application of passive filters for harmonics mitigation in a dual input converter / H. Prasad, T. D. Sudhakar // 2014 International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication (ICCPEIC), Chennai, India, 2014, pp. 241-244.

89. Uddin, N. Evaluation of Active Filter Design and Harmonics Analysis Using MATLAB / N. Uddin, M. Ebrahim Khallil, T. Kumar Das, S. Sarker // 2021 International Conference on Automation, Control and Mechatronics for Industry 4.0 (ACMI), Rajshahi, Bangladesh, 2021, pp. 1-6.

90. Chatterjee, S. Compact Hairpin-Line Bandpass Filter with Harmonic Suppression by Periodic Grooves / S. Chatterjee, T. K. Das // 2019 IEEE 19th Mediterranean Microwave Symposium (MMS), Hammamet, Tunisia, 2019, pp. 1-4.

91. Kor.srisuwan, S. The Harmonic Mitigation in the Smelting Industry Connected to Active Distribution Network in Phetchaburi Province Using Single-Tuned Passive Harmonic Filters Considering Load Demand / S. Kor.srisuwan, N. Janjamraj, K. Bhumkittipich, S. Romphochai // 2022 International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI), Pattaya Chonburi, Thailand, 2022, pp. 1-4.

92. Kedra, B. Comparison of an active and hybrid power filter devices / B. Kedra // 2014 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Bucharest, Romania, 2014, pp. 556-560.

93. Atkinson-Hope, G. Effectiveness of filter types on efficiency in networks containing multiple capacitors and harmonic sources / G. Atkinson-Hope, H. Amushembe, W. Stemmet // 2014 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), Perth, WA, Australia, 2014, pp. 1-6.

94. Mas Noor, F. R. Harmonics Fault Study And Analysis Procedures Using Portable Power Analyzer And Solutions Using Active Harmonics Filters / F. R. Mas

Noor, F. Ronilaya, M. N. Hidayat // 2022 International Conference on Electrical and Information Technology (IEIT), Malang, Indonesia, 2022, pp. 1-6.

95. Mas Noor, F. R. Harmonics Fault Study And Analysis Procedures Using Portable Power Analyzer And Solutions Using Active Harmonics Filters / F. R. Mas Noor, F. Ronilaya, M. N. Hidayat // 2022 International Conference on Electrical and Information Technology (IEIT), Malang, Indonesia, 2022, pp. 1-6.

96. Zoghbi, A. FPGA in the loop implementation of an adaptive-filtering based control of shunt active power filter / A. Zoghbi and D. Berkani // 2020 IEEE 7th International Conference on Engineering Technologies and Applied Sciences (ICETAS), Kuala Lumpur, Malaysia, 2020, pp. 1-5.

97. Rasul, M. J. M. A. Harmonic mitigation of a grid-connected photovoltaic system using shunt active filter / M. J. M. A. Rasul, H. V. Khang, M. Kolhe // 2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Sydney, NSW, Australia, 2017, pp. 1-5.

98. Na, H. A Novel Shunt Hybrid Power Filter for Suppressing Harmonics / H. Na, W. Jian and X. Dianguo // 2006 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Montreal, QC, Canada, 2006, pp. 1155-1160.

99. Assi, A. Design of the hybrid harmonic filter to improve power quality of the grid connected hybrid renewable energy system / A. Assi, S. M. Moghaddas Tafreshi // 2019 Iranian Conference on Renewable Energy & Distributed Generation (ICREDG), Tehran, Iran, 2019, pp. 1-6.

100. Chatterjee, S. Multispurious Harmonic Suppression in Compact Coupled-Line Bandpass Filters by Trapezoidal Corrugations / S. Chatterjee, T. K. Das // 2018 18th Mediterranean Microwave Symposium (MMS), Istanbul, Turkey, 2018, pp. 149-152.

101. Suresh, S. Design and analysis of shunt hybrid filter control topology for mitigation of load current harmonics / S. Suresh, N. Devarajan, V. Rajasekaran // 2012 Annual IEEE India Conference (INDICON), Kochi, India, 2012, pp. 1189-1193.

102. Setiabudy, R. Selection of Single-tuned Filter and High Pass Damped Filter with Changes of Inverter Type to Reduce Harmonics on Microgrid AC-DC / R.

Setiabudy, G. P. Wibowo, Herlina // 2018 International Conference on Electrical Engineering and Computer Science (ICECOS), Pangkal, Indonesia, 2018, pp. 275-280.

103. Panmala, N. Design and Implementation of Passive Harmonic Filter Using Simulation Tool / N. Panmala, P. Sriyanyong // 2019 Research, Invention, and Innovation Congress (RI2C), Bangkok, Thailand, 2019, pp. 1-5.

104. Ayoub, M. M. Optimal Design of Hybrid Active Power Filter Based on Transient Search Optimization / M. M. Ayoub, M. H. Hassan, S. Kamel, F. Jurado // 2021 12th International Renewable Energy Congress (IREC), Hammamet, Tunisia, 2021, pp. 1-6.

105. Yousefi, M. Design and integration of a high-order hairpin bandpass filter with a spurious suppression circuit / M. Yousefi, H. Aliakbarian, R. Sadeghzadeh // 2015 Loughborough Antennas & Propagation Conference (LAPC), Loughborough, UK, 2015, pp. 1-4.

106. Chatterjee, S. Harmonic Suppression in In-line Parallel-Coupled Microstrip Bandpass Filter by Minkowski Fractals / S. Chatterjee, T. K. Das and B. Gupta // 2017 Mediterranean Microwave Symposium (MMS), Marseille, France, 2017, pp. 1-4.

107. Jin, Q. A Control Method of Shunt Active Power Filter for System-wide Harmonic Suppression Based on Complex-valued Neural Network / Q. Jin, Z. Yao, M. Guo // 2020 IEEE 9th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC2020-ECCE Asia), Nanjing, China, 2020, pp. 1543-1548.

108. Wang, Y. A Comprehensive Investigation On the Selection of High-Pass Harmonic Filters / Y. Wang, P. Chen, J. Yong, W. Xu, S. Xu, K. Liu // in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 37, no. 5, pp. 4212-4226.

109. Aksoy, S. C. A multilayered combline filter with high harmonic suppression / S. C. Aksoy, A. İ. Çubukçu, İ. Yıldız // 2016 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS), San Francisco, CA, USA, 2016, pp. 1-3.

110. Boonseng, C. Designing Harmonic Filters for Improving Power Factor and Quality of Synchronous Generator in Sugar Mill Plant / C. Boonseng, K. Kularbphetpong // 2019 International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI), Pattaya, Thailand, 2019, pp. 138-141.

111. Rodriguez Maldonado, J. Total Harmonic Distortion Estimation, Minimization Inter Harmonic Amplitude and Expanding Bands Rejection in TKF filters / J. Rodriguez Maldonado // in IEEE Latin America Transactions, vol. 14, no. 2, pp. 652-656, Feb. 2016.

112. Храмшин, Т.Р. Математическая модель активного выпрямителя в несимметричных режимах работы / Т.Р. Храмшин, Д.С. Крубцов, Г.П. Корнилов // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2014. – Т. 1, № 2. – С. 3–9.

113. Шрейнер, Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. Екатеринбург: УрО РАН, 2010. 654 с.

114. Kolap, G. Harmonic mitigation by shunt passive power filter at voltage source type non-linear load / G. Kolap, S. U. Bagwan, P. Chougule, B. Ghule, N. Nangare // 2020 5th International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES), Coimbatore, India, 2020, pp. 84-89.

115. Николаев, А.А. Повышение качества электроэнергии в системах электроснабжения прокатных станков с использованием преобразователей частоты с активными выпрямителями за счет применения специализированных пассивных фильтров / А.А. Николаев, **М.Ю. Афанасьев**, И.Г. Гилемов, М.В. Буланов // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2023. – №. 1. – С. 41-52. DOI: 10.17588/2072-2672.2023.1.041-052

116. Николаев, А.А. Методика выбора параметров пассивного фильтра для повышения качества электроэнергии в электрических сетях с активными выпрямителями / А. А. Николаев, **М. Ю. Афанасьев**, А. С. Маклаков, М. В. Буланов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2023 - – Т. 19 - №3 - С. 9-25 – DOI 10.17122/1999-5458-2023-19-3-9-25.

117. Nikolaev, A.A. Current Electromagnetic Compatibility Problems of High-Power Industrial Electric Drives with Active Front-End Rectifiers Connected to a 6–35 kV Power Grid: A Comprehensive Overview. / Nikolaev A, Maklakov A, Bulanov M,

Gilemov I, Denisevich A, **Afanasev M.** // *Energies*. 2023; 16(1):293. <https://doi.org/10.3390/en16010293>.

118. Nikolaev, A.A. Application of a Specialized Passive Filter to Correct the Frequency Response of the Supply Network in order to Eliminate the Negative Impact of Resonance Phenomena / A.A. Nikolaev, **M. Yu. Afanasev**, M.V. Bulanov// *Proceedings of the 2020 IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research and Practice (PEAMI)*. – Magnitogorsk, Russia. – 25-26 Sept. 2020. – pp. 32-37, doi: 10.1109/PEAMI49900.2020.9234378.

119. Nikolaev, A.A. Improving Power Quality in Power Supply Systems for Rolling Mills FC-AR due to the Use of Specialised Passive Filters / A. A. Nikolaev, **M. Y. Afanasev**, M. V. Bulanov// *2021 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*. – Magnitogorsk, Russia. – 24-26 Sept. 2021. – pp. 546-551, doi: 10.1109/UralCon52005.2021.

120. **Afanasev, M.Y.** The Experience of using Specialised Correction Filters to Improve Power Quality in Electrical Networks with Active Rectifiers / **M.Y. Afanasev**, A.C. Denisevich, M.V. Bulanov and P. G. Tulupov // *2022 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*, Magnitogorsk, Russian Federation, 2022, pp. 386-391, doi: 10.1109/UralCon54942.2022.9906675.

121. Nikolaev, A. A. New Methodology for Calculation of the Special Passive Filter Parameters with the Aim of Voltage Quality Improving in Networks with Active Rectifie / A. A. Nikolaev, **M. Y. Afanasev**, A. S. Denisevich and A. S. Maklakov // *2023 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*, Sochi, Russian Federation, 2023, pp. 1139-1145, doi: 10.1109/RusAutoCon58002.2023.10272845.

122. Николаев, А.А. Обеспечение электромагнитной совместимости мощных электроприводов с активными выпрямителями с питающей сетью за счет использования специализированных корректирующих фильтров / А.А. Николаев, **М.Ю. Афанасьев**, М.В. Буланов, И.Г. Гилемов // *Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: Тезисы 80-й международной научно-технической конференции, Магнитогорск, 18–22 апреля 2022 года. Том 1.* –

Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2022. – С. 264.

123. Афанасьев, М.Ю. Разработка методики выбора параметров специализированного корректирующего фильтра для улучшения качества электроэнергии в сетях с активными выпрямителями при наличии резонансных явлений / **М.Ю. Афанасьев**, А.С. Денисевич // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: Тезисы 81-й международной научно-технической конференции, Магнитогорск, 18–20 апреля 2023 года. Том 1. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2023. – С. 265.

124. Николаев, А.А. Обеспечение электромагнитной совместимости мощных электроприводов четырехклетьевого стана ППП ХП ЧЕРМК ПАО «Северсталь» с питающей сетью 10 кВ / А.А. Николаев, М.В. Буланов, И.Г. Гилемов, **М.Ю. Афанасьев**, К.А. Шахбиева // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. - 2021. Т.12. №1. – С. 65-74.

125. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023683895. Программа для расчета параметров специализированного пассивного фильтра для улучшения качества электроэнергии в электрических сетях с активными выпрямителями / А.А. Николаев, М.В. Буланов, П.Г. Тулупов, **М.Ю. Афанасьев**; № 2023682320: заявл. 27.10.2023: опубл. 10.11.2023.1690 кб.

126. Николаев, А.А. Обеспечение электромагнитной совместимости мощных электроприводов четырехклетьевого стана ППП ХП ЧЕРМК ПАО «Северсталь» с питающей сетью 10 кВ / А.А. Николаев, М.В. Буланов, И.Г. Гилемов, **М.Ю. Афанасьев**, К.А. Шахбиева // Сборник трудов 79-ой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования»: – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та. – 2021. – С. 246.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Параметры кабельных линий

Таблица А.1 - Параметры кабельных линий, отходящих от ЗРУ-10 кВ ГПП до цеховых распределительных подстанций

Секция	Трасса (начало)	Трасса (конец)	Марка ВЛ/КЛ	Сечение ВЛ/КЛ	Кол-во	Длина, м	Фидер	Ro, Ом/км	Lo, мГн/км	Суд, мкФ/км	C _Σ , мкФ
1	ГПП	РП-4 РУ 10 кВ МЕС02	ПвВнг(А)-LS	3(1*70)	3	440	1	0,342	0,376	0,29	0,3828
	ГПП	ЗРУ 10кВ Секция Т	ПвВнг-LS	3(1*240/95)	2	20	2	0,098	0,3	0,46	0,0184
	ГПП	РП-4 РУ 10 кВ МЕС01	ПвВнг(А)-LS	3(1*95)	3	440	3	0,247	0,353	0,32	0,4224
	ГПП	РУ 10кВ БРВ	ПвВнг(А)-LS	3(1*95)	2	940	4	0,247	0,353	0,32	0,6016
	ГПП	РП-2 РУ 10кВ Водоподготовка	ПвВнг(А)-LS	3(1*95)	1	240	6	0,247	0,353	0,32	0,0768
	ГПП	КТП 1*630 кВА АБК	ПвВнг(А)-LS	3(1*50)	1	320	7	0,494	0,4	0,25	0,08
	ГПП	РП-1 РУ 10кВ Скрапного отделения	ПвВнг(А)-LS	3(1*150/50)	1	515	8	0,159	0,323	0,38	0,1957
	ГПП	РП-5 РУ 10кВ Газоочистки	ПвВнг(А)-LS	3(1*300)	1	550	10	0,079	0,285	0,51	0,2805
2	ГПП	РП-3 РУ 10кВ ЭСПЦ	ПвВнг(А)-LS	3(1*185/25)	2	450	11	0,128	0,312	0,42	0,378
	ГПП	ДГР1	ПвВнг-LS	3(1*70/50)	1	40	13	0,342	0,376	0,29	0,0116
	ГПП	ЗРУ 10кВ Секция Т	ПвВнг-LS	3(1*240/95)	2	20	18	0,098	0,3	0,46	0,0184
	ГПП	РУ 10кВ БРВ	ПвВнг(А)-LS	3(1*95)	2	940	19	0,247	0,353	0,32	0,6016
	ГПП	РП-4 РУ 10 кВ МЕС01	ПвВнг(А)-LS	3(1*95)	3	440	20	0,247	0,353	0,32	0,4224
	ГПП	ДГР2	ПвВнг-LS	3(1*70/50)	1	40	22	0,342	0,376	0,29	0,0116
	ГПП	КТП 1*630 кВА АБК	ПвВнг(А)-LS	3(1*50)	1	320	23	0,494	0,4	0,25	0,08
	ГПП	РП-4 РУ 10 кВ МЕС02	ПвВнг(А)-LS	3(1*70)	3	440	25	0,342	0,376	0,29	0,3828
Т	ГПП	РП-5 РУ 10кВ Газоочистки	ПвВнг(А)-LS	3(1*300)	1	550	26	0,079	0,285	0,51	0,2805
	ГПП	РП-3 РУ 10кВ ЭСПЦ	ПвВнг(А)-LS	3(1*185/25)	2	450	27	0,128	0,312	0,42	0,378
	ГПП	РП-2 РУ 10кВ Водоподготовка	ПвВнг(А)-LS	3(1*95)	1	240	31	0,247	0,353	0,32	0,0768
	ГПП	ФКУ 1000 кВАр	ПвВнг-LS	3*50/25	1	5	2Т	0,494	0,4	0,25	0,00125
	ГПП	12КТПЗ АБК	ПвПуг	3*50	1	320	3Т	0,494	0,4	0,25	0,08
	ГПП	РП-2 РУ 10кВ Водоподготовка	ПвВнг	3*50	1	240	4Т	0,494	0,4	0,25	0,06
	ГРУ ТЭЦ-4	Секция Т ЗРУ-10 кВ ГПП	ПвПуг	3(1*300/25)	2	4570	5Т	0,079	0,418	0,478	4,37
	ГРУ ТЭЦ-4	Секция Т ЗРУ-10 кВ ГПП	ПвПуг	3(1*300/25)	2	4530	7Т	0,079	0,418	0,478	4,33
	ГПП	РП-3 РУ 10кВ ЭСПЦ	ПвВнг(А)-LS	3(1*150/25)	1	450	8Т	0,159	0,323	0,38	0,171
	ГПП	РП-1 РУ 10кВ Скрапного отд.	ПвВнг(А)-LS	3(1*150/50)	1	430	10Т	0,159	0,323	0,38	0,1634

Таблица А.2 - Параметры кабельных линий 10 кВ, отходящих от РП-5 (газоочистка) до КТП и высоковольтных электроприемников

Секция	Трасса (начало)	Трасса (конец)	Марка ВЛ/КЛ	Сечение ВЛ/КЛ	Кол-во	Длина, м	Фидер	Ro, Ом/км	Lo, мГн/км	Суд, мкФ/км	С Σ , мкФ
1	РУ-10 кВ, яч.1	4КТП1 3000 кВА пресс-ножницы	ПвВнг	3(1*150/25)	1	180	1	0,159	0,323	0,38	0,0684
			ПвВнг	3(1*70/35)	1	30		0,342	0,376	0,29	0,0087
			АС	70/11	1	740				0,032	0,07104
	РУ - 10кВ, яч.5	РП-10кВ	ПвПуг	3(1*240/25)	1	150	5	0,098	0,3	0,46	0,069
	РУ - 10кВ, яч.4	УКРМ 1600 кВАр	ПвПуг	3(1*50/16)	1	25	6	0,494	0,4	0,25	0,00625
2	РУ - 10кВ, яч.3	30КТП2 630 кВА КНС-2	ПвВнг	3(1*70/35)	1	530	7	0,342	0,376	0,29	0,1537
	РУ - 10кВ, яч.10	КТП 3000 кВА	ПвПуг	3(1*70/16)	1	25	16	0,342	0,376	0,29	0,00725
	РУ - 10кВ, яч.16	КТПН7	ПвВнг	3(1*150/25)	1	180		0,159	0,323	0,38	0,0684
			АС	70/11	1	178				0,032	0,017088
			АС	70/11	1	178				0,032	0,017088
			АС	70/11	1	682				0,032	0,065472
	ВРУ 10 кВ	30КТП1 630 кВА КНС-2	АС	70/11	1	50				0,032	0,0048
			КТПН15 АГРС 250 кВА	АС	120/19	1		558			0,032
		38КТП1 630 кВА Насосная 1-го подъема	АС	70/11	1	129				0,032	0,012384
			АС	120/19	1	1207				0,032	0,115872
АПВП-10			3(1*150/25)	1	900	0,159		0,323	0,38	0,342	

Таблица А.3 - Параметры кабельных линий 10 кВ, отходящих от РП-3 ЭСПЦ до КТП и высоковольтных электроприемников

Секция	Трасса (начало)	Трасса (конец)	Марка ВЛ/КЛ	Сечение ВЛ/КЛ	Кол-во	Длина, м	Фидер	Ro, Ом/км	Lo, мГн/км	Суд, мкФ/км	С Σ , мкФ
1	ГПП 220/35/10, РУ-10 кВ, яч.№11	РПЗ «ЭСПЦ» РУ-10 кВ, яч.№2	ПвВнг(А)-LS (N2XSH)	3(1*185/25)	2	450	2	0,128	0,312	0,42	0,378

Продолжение таблицы А.3

Секция	Трасса (начало)	Трасса (конец)	Марка ВЛ/КЛ	Сечение ВЛ/КЛ	Кол-во	Длина, м	Фидер	Ro, Ом/км	Lo, мГн/км	Суд, мкФ/км	СΣ, мкФ
1	РПЗ «ЭСЦ» РУ-10 кВ, яч№2	РПЗ «ЭСЦ» РУ-10 кВ, яч№1	ПвВнг(А)-НФ	3*95/16	1	6	2	0,247	0,353	0,32	0,00192
	РПЗ «ЭСЦ» РУ-10 кВ, яч№3	1КТП1 – 1КТП3 Тр-ор 1TR1	ПвВнг(А)-LS (N2XSH)	3*95/16	1	80	3	0,247	0,353	0,32	0,0256
	РПЗ «ЭСЦ» РУ-10 кВ, яч№4	Помещение подстанции 1КТП4 – 1КТП7, 1КТП4	ПвВнг(А)-НФ	3*95/16	1	50	4	0,247	0,353	0,32	0,016
	РПЗ «ЭСЦ» РУ-10 кВ, яч№6	РПЗ «ЭСЦ» РУ-10 кВ, УКРМ1	ПвВнг(А)-НФ	3*95/16	1	31	6	0,247	0,353	0,32	0,00992
	РПЗ «ЭСЦ» РУ-10 кВ, яч№7	Помещение компрессорной, механизм АД1	ПвВнг(А)-НФ	3*95/16	1	41	7	0,247	0,353	0,32	0,01312
2	РПЗ «ЭСЦ» РУ-10 кВ, яч№10	Помещение компрессорной, механизм АД2	ПвВнг(А)-НФ	3*95/16	1	47	10	0,247	0,353	0,32	0,01504
	РПЗ «ЭСЦ» РУ-10 кВ, яч№11	РПЗ «ЭСЦ» РУ-10 кВ, УКРМ2	ПвВнг(А)-НФ	3*95/16	1	39	11	0,247	0,353	0,32	0,01248
	РПЗ «ЭСЦ» РУ-10 кВ, яч№13	Помещение подстанции 1КТП4 – 1КТП7, 1КТП5 тр-ор	ПвВнг(А)-НФ	3*95/16	1	42	13	0,247	0,353	0,32	0,01344
	РПЗ «ЭСЦ» РУ-10 кВ, яч№14	Помещение подстанции 1КТП4 – 1КТП7, 1КТП7 тр-ор	ПвВнг(А)-НФ	3*95/16	1	41	14	0,247	0,353	0,32	0,01312
	РПЗ «ЭСЦ» РУ-10 кВ, яч№15	РПЗ «ЭСЦ» РУ-10 кВ, яч№16	ПвВнг(А)-НФ	3*95/16	1	6	15	0,247	0,353	0,32	0,00192
	ГПП 220/35/10, РУ-10 кВ, яч№27	РПЗ «ЭСЦ» РУ-10 кВ, яч№15	ПвВнг(А)-LS (N2XSH)	3(1*185/25)	2	450	15	0,128	0,312	0,42	0,378
	РПЗ «ЭСЦ» РУ-10 кВ, яч№17	1КТП1 – 1КТП3 Тр-ор 1TR2	ПвВнг(А)-LS (N2XSH)	3*95/16	1	40	17	0,247	0,353	0,32	0,0128
	РПЗ «ЭСЦ» РУ-10 кВ, яч№3Б	Помещение компрессорной, механизм АД4	ПвВнг	3(1*150/25)	1	80	3Б	0,159	0,323	0,38	0,0304
Т	РПЗ «ЭСЦ» РУ-10 кВ, яч№3Т	Помещение компрессорной, механизм АД3	ПвВнг(А)-НФ	3*95/16	1	45	3Т	0,247	0,353	0,32	0,0144
	РПЗ «ЭСЦ» РУ-10 кВ, яч№4Т	РПЗ «ЭСЦ» РУ-10 кВ, УКРМ «Т»	ПвВнг(А)-НФ	3*95/16	1	31	4Т	0,247	0,353	0,32	0,00992

Продолжение таблицы А.3

Секция	Трасса (начало)	Трасса (конец)	Марка ВЛ/КЛ	Сечение ВЛ/КЛ	Кол-во	Длина, м	Фидер	Ro, Ом/км	Lo, мГн/км	Суд, мкФ/км	C Σ , мкФ
Т	РПЗ «ЭСЦ» РУ-10 кВ, яч№7Т	1КТП1 – 1КТП3 Тр-ор 1ТР3	ПвВнг(А)-LS(N2XSH)	3*95/16	1	40	7Т	0,247	0,353	0,32	0,0128
	РПЗ «ЭСЦ» РУ-10 кВ, яч№8Т	Помещение подстанции 1КТП4 – 1КТП7, 1КТП6 тр-ор	ПвВнг(А)-HF	3*95/16	1	52	8Т	0,247	0,353	0,32	0,01664
	ГПП 220/35/10, РУ-10 кВ, яч№8Т	РПЗ «ЭСЦ» РУ-10 кВ, яч№5Т	ПвВнг(А)-LS (N2XSH)	3(1*150/25)	1	450	5Т	0,159	0,323	0,38	0,171
	РПЗ «ЭСЦ» РУ-10 кВ, яч№9Т	СПЦ эл.пом. JA01E01 разъединитель JC01E10+LDS02	ПвВнг(А)-LS (N2XSH)	3(1*95/16)	1	–	9Т	0,247	0,353	0,32	0

Таблица А.4 - Параметры кабельных линий 10 кВ, отходящих от секций БРВ к высоковольтным электроприемникам

Секция	Трасса (начало)	Трасса (конец)	Марка ВЛ/КЛ	Сечение ВЛ/КЛ	Кол-во	Длина, м	Фидер	Ro, Ом/км	Lo, мГн/км	Суд, мкФ/км	C Σ , мкФ
1	РУ - 10кВ	Электродвигатель компрессора С01-М	ПвВнг	3(1*300/25)	1	150	1	0,079	0,285	0,51	0,0765
	РУ - 10кВ	Электродвигатель компрессора С05-М	ПвВнг	3(1*120/16)	1	150	2	0,196	0,338	0,35	0,0525
	РУ - 10кВ	Трансформатор TR1 10/0,4 кВ	ПвВнг	3(1*120/16)	1	40	3	0,196	0,338	0,35	0,014
	РУ - 10кВ	Конденсаторная установка 10 кВ УС1	ПвВнг	3(1*70/16)	1	40	4	0,342	0,376	0,29	0,0116
	РУ - 10кВ	Конденсаторная установка 10 кВ УС2	ПвВнг	3(1*70/16)	1	40	5	0,342	0,376	0,29	0,0116

Таблица А.5 - Параметры кабельных линий 10 кВ, отходящих от РП-2 (водоподготовка) до КТП и высоковольтных электроприемников

Секция	Трасса (начало)	Трасса (конец)	Марка ВЛ/КЛ	Сечение ВЛ/КЛ	Кол-во	Длина, м	Фидер	Ro, Ом/км	Lo, мГн/км	Суд, мкФ/км	C Σ , мкФ
1	РУ - 10кВ	T1 3000 кВА	ПвВнг(А)-LS	3(1*50)	1	40	4	0,494	0,4	0,25	0,01
	РУ - 10кВ	T5 250 кВА	ПвПуг	3(1*70)	1	150	5	0,342	0,376	0,29	0,0435
2	РУ - 10кВ	T2 3000 кВА	ПвВнг(А)-LS	3(1*50)	1	40	18	0,494	0,4	0,25	0,01
	РУ - 10кВ	T4 3000 кВА	ПвВнг(А)-LS	3(1*50)	1	40	19	0,494	0,4	0,25	0,01
Т	РУ - 10кВ	T3 3000 кВА	ПвВнг(А)-LS	3(1*50)	1	40	11	0,494	0,4	0,25	0,01

Таблица А.6 - Параметры кабельных линий 10 кВ, отходящих от РП-4 МЕСО1 до понижительных трансформаторов ПЧ электроприводов механизмов сортопрокатного цеха

Секция	Начало (номер ячейки)	Конец	Марка ВЛ/КЛ	Сечение ВЛ/КЛ	Кол- во	Длина, м	Фидер	Ro, Ом/км	Lo, мГн/км	Суд, мкФ/км	C Σ , мкФ
1	JA01E10+MEC01 (A02)	JD01E10+PTR01	ПвВнг(F)-LS	3*120	1	50	2	0,196	0,338	0,35	0,0175
	JA01E10+MEC01 (A03)	JD01E10+PTR02	ПвВнг(F)-LS	3*120	1	45	3	0,196	0,338	0,35	0,01575
	JA01E10+MEC01 (A04)	JD01E10+PTR03	ПвВнг(F)-LS	3*120	1	40	4	0,196	0,338	0,35	0,014
	JA01E10+MEC01 (A05)	JD01E10+PTR04	ПвВнг(F)-LS	3*120	1	35	5	0,196	0,338	0,35	0,01225
	JA01E10+MEC01 (A06)	JD01E10+PTR09	ПвВнг(F)-LS	3*120	1	30	6	0,196	0,338	0,35	0,0105
	JA01E10+MEC01 (A07)	JD01E10+PTR05	ПвВнг(F)-LS	3*120	1	20	7	0,196	0,338	0,35	0,007
	JA01E10+MEC01 (A08)	JD01E10+PTR06	ПвВнг(F)-LS	3*120	1	25	8	0,196	0,338	0,35	0,00875
	JA01E10+MEC01 (A09)	JD01E10+PTR07	ПвВнг(F)-LS	3*120	1	30	9	0,196	0,338	0,35	0,0105
	JA01E10+MEC01 (A12)	JD01E10+PTR08	ПвВнг(F)-LS	3*120	1	35	12	0,196	0,338	0,35	0,01225
	JA01E10+MEC01 (A13)	JD01E35+PTR01	ПвВнг(F)-LS	3*120	1	50	13	0,196	0,338	0,35	0,0175
	JA01E10+MEC01 (A14)	JD01E36+PTR01	ПвВнг(F)-LS	3*120	1	50	14	0,196	0,338	0,35	0,0175
	JA01E10+MEC01 (A15)	JF01E45+LDS01	ПвВнг(F)-LS	3*185	1	300	15	0,128	0,312	0,42	0,126
	JF01E45+LDS01	JF01E45+PTR01	ПвВнг(F)-LS	3*185	1	25	15	0,128	0,312	0,42	0,0105
	JA01E10+MEC01 (A16)	JE01E55+LDS01	ПвВнг(F)-LS	3*120	1	300	16	0,196	0,338	0,35	0,105
	JE01E55+LDS01	JE01E55+PTR01	ПвВнг(F)-LS	3*120	1	25	16	0,196	0,338	0,35	0,00875
	JA01E10+MEC01 (A17)	JE01E55+LDS02	ПвВнг(F)-LS	3*120	1	300	17	0,196	0,338	0,35	0,105
	JE01E55+LDS02	JE01E55+PTR02	ПвВнг(F)-LS	3*120	1	25	17	0,196	0,338	0,35	0,00875

Таблица А.7 - Параметры кабельных линий 10 кВ, отходящих от РП-4 МЕСО2 (сортопрокатный цех) до КТП

Секция	Начало (номер ячейки)	Конец	Марка ВЛ/КЛ	Сечение ВЛ/КЛ	Кол- во	Длина, м	Фиде р	Ro, Ом/км	Lo, мГн/км	Суд, мкФ/км	CΣ, мкФ
1	JA01E10+MEC02 (A02)	JC01E10+PTR01	ПвВнг(F)-LS	3*120	1	40	2	0,196	0,338	0,35	0,014
	JA01E10+MEC02 (A03)	JE01E60+PTR01	ПвВнг(F)-LS	3*120	1	65	3	0,196	0,338	0,35	0,02275
	JA01E10+MEC02 (A04)	JD01E10+PTR14	ПвВнг(F)-LS	3*120	1	70	4	0,196	0,338	0,35	0,0245
	JA01E10+MEC02 (A05)	JE01E10+LDS03	ПвВнг(F)-LS	3*120	1	300	5	0,196	0,338	0,35	0,105
	JE01E10+LDS03	JA01E10+PTR03	ПвВнг(F)-LS	3*120	1	25	5	0,196	0,338	0,35	0,00875
2	JA01E10+MEC02 (A09)	JD01E10+LDS1 5	ПвВнг(F)-LS	3*120	1	300	9	0,196	0,338	0,35	0,105
	JD01E10+LDS15	JD01E10+PTR15	ПвВнг(F)-LS	3*120	1	25	9	0,196	0,338	0,35	0,00875
	JA01E10+MEC02 (A10)	JF01E45+LDS02	ПвВнг(F)-LS	3*120	1	300	10	0,196	0,338	0,35	0,105
	JF01E45+LDS02	JF01E45+PTR02	ПвВнг(F)-LS	3*120	1	25	10	0,196	0,338	0,35	0,00875
	JA01E10+MEC02 (A11)	JE01E10+LDS01	ПвВнг(F)-LS	3*120	1	300	11	0,196	0,338	0,35	0,105
	JE01E10+LDS01	JE01E10+PTR01	ПвВнг(F)-LS	3*120	1	25	11	0,196	0,338	0,35	0,00875
JA01E10+MEC02 (A12)	JC01E10+PTR02	ПвВнг(F)-LS	3*120	1	85	12	0,196	0,338	0,35	0,02975	

Таблица А.8 - Параметры кабельных линий 10 кВ, отходящих от РП-1 (скрапное отделение) до КТП и высоковольтных электроприемников

Секция	Трасса (начало)	Трасса (конец)	Марка ВЛ/КЛ	Сечение ВЛ/КЛ	Кол- во	Длина, м	Фидер	Ro, Ом/км	Lo, мГн/км	Суд, мкФ/км	CΣ, мкФ
1	ГПП 220/35/10, РУ-10 кВ, яч.8	РП1 «Скрапное отделение» РУ-10 кВ яч.2	ПвВнг(A)-LS (N2XSH)	3(1*150/50)	1	515	2	0,159	0,323	0,38	0,1957
	РП1 «Скрапное отделение» РУ-10 кВ яч.2	РП1 «Скрапное отделение» РУ-10 кВ яч.1	ПвВнг(A)-LS (N2XSEH)	3*95/16	1	10	2	0,247	0,353	0,32	0,0032
	РП1 «Скрапное отделение» РУ-10 кВ яч.4	РП1 «Скрапное отделение» 6КТП1 Тр-р 3000 кВА (резерв)	ПвВнг(A)-LS (N2XSEH)	3*95/16	1	33	4	0,247	0,353	0,32	0,0106

Продолжение таблицы А.8

Секция	Трасса (начало)	Трасса (конец)	Марка ВЛ/КЛ	Сечение ВЛ/КЛ	Кол-во	Длина, м	Фидер	Ro, Ом/км	Lo, мГн/км	Суд, мкФ/км	C Σ , мкФ
1	РП1 «Скрапное отделение» РУ-10 кВ яч.5	4КТП1 Тр-р 3000 кВА	ПвВнг(А)-LS (N2XSEH)	3*95/16	1	29	5	0,247	0,353	0,32	0,0093
Т	РП1 «Скрапное отделение» РУ-10 кВ яч.8	РП1 «Скрапное отделение» РУ-10 кВ шкаф УКРМ	ПвВнг(А)-LS (N2XSEH)	3*95/16	1	30	8	0,247	0,353	0,32	0,0096
	РП1 «Скрапное отделение» РУ-10 кВ яч.9	РП1 «Скрапное отделение» ВРУ-10 кВ Гл.троллей	ПвВнг(А)-LS (N2XSEH)	3*95/16	1	25	9	0,247	0,353	0,32	0,008
	РП1 «Скрапное отделение» РУ-10 кВ яч.13	РП1 «Скрапное отделение» РУ-10 кВ яч.14	ПвВнг(А)-LS (N2XSEH)	3*95/16	1	10	13	0,247	0,353	0,32	0,0032
	ГПП 220/35/10, РУ-10 кВ, яч.20	РП1 «Скрапное отделение» РУ-10 кВ яч.13	ПвВнг(А)-LS (N2XSH)	3(1*150/50)	1	37	13	0,159	0,323	0,38	0,0141

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Суммарные емкости кабельных линий

Таблица Б.1 - Суммарные емкости кабельных линий по фидерам секций ЗРУ-10 кВ (первый вариант схемы электроснабжения – 2015 г., отдельная работа секций №1 и №2 ЗРУ-10 кВ ГПП)

Секция ГПП	Номер ячейки	Трасса (конец)	С Σ , мкФ	
1	1	РП4 РУ-10 кВ МЕС02	0,383	3,01
	2	ЗРУ 10кВ Секция Т	0	
	3	РП4 РУ-10 кВ МЕС01 (рез.ввод)	0,422	
	4	БРВ	0,768	
	6	РП2 ЗРУ-10 кВ Водоподготовка	0,160	
	7	12КТП1 630 кВА АБК	0,08	
	8	РП1 РУ-10 кВ Скрапное отделение	0,205	
	10	РП5 РУ-10 кВ Газоочистка	0,281	
	11	РП3 РУ-10 кВ ЭСПЦ	0,698	
	13	ДГР1	0,012	
2	18	ЗРУ 10кВ Секция Т	0,018	3,871
	19	БРВ (рез. ввод)	0,602	
	20	РП4 РУ-10 кВ МЕС01	0,634	
	22	ДГР2	0,012	
	23	12КТП3 630 кВА АБК	0,08	
	25	РП4 РУ-10 кВ МЕС02 (рез.ввод)	0,785	
	26	РП5 РУ-10 кВ Газоочистка (рез. ввод)	1,362	
	27	РП3 РУ-10 кВ ЭСПЦ (рез.ввод)	0,378	
	31	РП2 ЗРУ-10 кВ Водоподготовка (рез.ввод)	0	
Т	2Т	ФКУ 1000 кВАр	0,001	4,433
	3Т	12КТП3 630 кВА АБК	0,08	
	4Т	РП2 ЗРУ-10 кВ Водоподготовка (рез.ввод)	0	
	5Т	ГРУ-10 кВ ТЭЦ-4 ф. 39 (отключен)	0	
	7Т	ГРУ-10 кВ ТЭЦ-4 ф. 1 (в работе)	4,33	
	8Т	РП3 РУ-10 кВ ЭСПЦ (рез. ввод)	0	
	10Т	РП1 РУ-10 кВ Скрапное отделение	0,022	

Таблица Б.2 - Суммарные емкости кабельных линий по фидерам секций ЗРУ-10 кВ (второй вариант схемы электроснабжения – 2016 г., параллельная работа секций №1 и №2 ЗРУ-10 кВ ГПП)

Секция ГПП	Номер ячейки	Трасса (конец)	С _Σ , мкФ	
1	1	РП4 РУ-10 кВ МЕС02	0,785	4,49
	2	ЗРУ 10кВ Секция Т	0	
	3	РП4 РУ-10 кВ МЕС01 (рез.ввод)	0,422	
	4	БРВ	0,768	
	6	РП2 ЗРУ-10 кВ Водоподготовка	0,160	
	7	12КТП1 630 кВА АБК	0,08	
	8	РП1 РУ-10 кВ Скрапное отделение	0,205	
	10	РП5 РУ-10 кВ Газоочистка	1,362	
	11	РП3 РУ-10 кВ ЭСПЦ	0,698	
	13	ДГР1	0,012	
2	18	ЗРУ 10кВ Секция Т	0,018	2,11
	19	БРВ (рез.ввод)	0,602	
	20	РП4 РУ-10 кВ МЕС01	0,634	
	22	ДГР2	0,012	
	23	12КТП3 630 кВА АБК	0,08	
	25	РП4 РУ-10 кВ МЕС02 (рез.ввод)	0,383	
	26	РП5 РУ-10 кВ Газоочистка (рез. ввод)	0	
	27	РП3 РУ-10 кВ ЭСПЦ (рез.ввод)	0,378	
	31	РП2 ЗРУ-10 кВ Водоподготовка (рез.ввод)	0	
Т	2Т	ФКУ 1000 кВАр	0,0013	4,433
	3Т	12КТП3 630 кВА АБК	0,08	
	4Т	РП2 ЗРУ-10 кВ Водоподготовка (рез.ввод)	0	
	8Т	РП3 РУ-10 кВ ЭСПЦ (рез.ввод)	0	
	5Т	ГРУ-10 кВ ТЭЦ-4 ф. 39 (отключен)	0	
	7Т	ГРУ-10 кВ ТЭЦ-4 ф. 1 (в работе)	4,33	
	10Т	РП1 РУ-10 кВ Скрапное отделение	0,014	

ПРИЛОЖЕНИЕ В

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель главного электрика
АО «Металлургический завод Балаково»
/ Пупышев Е.Г. /

М.П.

« 18. » октябрь 2023 г.

АКТ

об использовании результатов диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Афанасьева Максима Юрьевич

научный руководитель – заведующий кафедрой автоматизированного электропривода и мехатроники ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» канд. техн. наук, доцент

Николаев А.А.

Настоящим документом подтверждается использование результатов научных исследований соискателя Афанасьева М.Ю. на АО «Металлургический завод Балаково» (г. Балаково, Россия). Соискателем Афанасьевым М.Ю. был разработан и исследован новый способ улучшения качества напряжения **внутризаводской системы электроснабжения за счёт применения специализированных пассивных фильтров, а также разработана методика расчета параметров данных фильтров.**

В системе электроснабжения АО «Металлургический завод Балаково» на уровне напряжения 10 кВ имеются три мощных электропривода клеток скоростных проволочных блоков 2×2500 кВт и 6300 кВт с преобразователями частоты с активными выпрямителями (ПЧ-АВ) производства компании ТМЕИС (Toshiba-Mitsubishi). В активных выпрямителях в составе данных ПЧ-АВ используется алгоритм ШИМ с фиксированными углами переключения IEGT-транзисторов (Fixed Pulse Pattern Control). Применение данного алгоритма ШИМ приводит к появлению в сетевом токе АВ гармоник высокого порядка с частотами в диапазоне 2500-3500 Гц. Результаты проведённых экспериментальных исследований показали, что сильные искажения кривой напряжения в распределительной сети 10 кВ ($K_U = 8-11\%$), связанные с работой ПЧ-АВ ТМЕИС, приводили к аварийному выходу из строя чувствительных электроприемников, а именно групповых выпрямителей ПЧ Siemens S120 в составе электроприводов клеток сортового стана. Данные искажения возникали в том случае, когда резонанс токов в сети 10 кВ, образованный взаимодействием суммарной

емкостью кабельных линий и индуктивностью сетевого трансформатора 220/35 кВ, совпадал с областью частот генерирования гармоник ПЧ ТМЕІС1-3 с номерами $n = 49 - 71$.

Предлагаемый новый способ обеспечения ЭМС мощных ЭП с ПЧ-АВ отличается от известных тем, что для повышения показателей качества электроэнергии используется новый вид фильтрокомпенсирующих устройств – специализированный пассивный фильтр (СПФ), обеспечивающий сдвиг параллельного резонанса тока в высокочастотной области частотной характеристики сети 6-35 кВ в безопасную зону, где отсутствует наложение высокочастотных гармоник ПЧ-АВ. Параметры СПФ (емкости батарей конденсаторов и индуктивности воздушных реакторов) рассчитываются по специализированной методике, учитывающей наличие резонанса в частотной характеристике питающей. Методика расчета параметров специализированного пассивного фильтра, включает в себя следующие основные этапы: 1) составление математической модели системы внутривзаводского электроснабжения и модели ПЧ-АВ; 2) определение оптимальной мощности корректирующего фильтра с использованием оптимального критерия – минимальное значение суммарного коэффициента гармонического составляющего напряжения K_U , рассчитанного до 150 гармоники на общих секциях заводской ГПП; 3) при выбранной мощности СПФ должна обеспечиваться минимальная величина суммарного коэффициента гармонических составляющих тока K_I , не превышающая 45% для возможности эксплуатации конденсаторов с пленочным полипропиленовым диэлектриком; 4) дополнительная проверка на возникновение недопустимых уровней бросков тока и напряжений при включении СПФ.

Результаты диссертационной работы Афанасьева М.Ю. были использованы при выполнении НИОКР по договору №9000042266, в рамках которой были даны рекомендации по установке 2-х СПФ мощностью 750 кВАр в РУ-10 кВ РП-5 «Газоочистка». В соответствии с выданными рекомендациями компания ООО «СИНТЕК» в кооперации с компанией ENERLUX выполнило изготовление и установку СПФ с указанными параметрами. Использование СПФ позволило уменьшить среднюю величину **суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения в точке общего подключения электроприемников предприятия на общих секциях ЗРУ-10 кВ ГПП на $\delta K_U = -72\%$ до значения $K_U = 1,42\%$** , что обеспечило надежную работу главных электроприводов сортопрокатного стана и других чувствительных электроприёмников предприятия.