

На правах рукописи



АФАНАСЬЕВ МАКСИМ ЮРЬЕВИЧ

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

Специальность 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Магнитогорск – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент
Николаев Александр Аркадьевич

Официальные оппоненты:

Сычев Юрий Анатольевич

доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»,
профессор кафедры электроэнергетики
и электромеханики, (г. Санкт-Петербург)

Севостьянов Александр Александрович

кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО
«Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», заведующий
кафедрой электроэнергетики, электроснабжения и
силовой электроники, (г. Нижний Новгород)
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет МИСиС»,
(г. Москва)

Ведущая организация:

Защита состоится «15» марта 2024 г. в 15 час. 00 мин на заседании диссертационного совета 24.2.324.05 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» по адресу: 455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, ауд. 233.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте <http://magtu.ru/> ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Автореферат разослан « ____ » _____ 20__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.324.05
канд. техн. наук, доцент

Одинцов Константин Эдуардович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Технический прогресс в области автоматизированного электропривода (АЭП) характеризуется непрерывным совершенствованием его элементной базы в направлении роста мощности силовых полупроводниковых преобразователей. В этих условиях заметно обострилась проблема электромагнитной совместимости (ЭМС) элементов АЭП с питающей сетью. Особенно эта проблема актуальная для мощных электроприводов прокатных станов, выполненных на базе преобразователей частоты с активными выпрямителями (ПЧ-АВ), функционирующих на компактных металлургических заводах с производительностью в 1 – 2 млн. тонн стали в год. Основными компаниями, осуществляющими проектирование и строительство данных предприятий, являются: Danieli, SMS Semag, Primetals, WISDRI, Sinosteel. В системах внутривзаводского электроснабжения мини-заводов используются протяженные электрические сети с уровнем напряжения 6-35 кВ. При большой длине кабельных линий суммарная емкость кабелей может быть значительной, достигая нескольких микрофарад. Важно отметить, что в активных выпрямителях ПЧ-АВ применяются алгоритмы широтно-импульсной модуляции (ШИМ), генерирующие высокочастотные гармоники напряжения и тока на входе АВ с номерами выше 40-й. В результате взаимодействия индуктивностей сетевых трансформаторов и емкостей кабельных линий в частотной характеристике сети (ЧХС) 6-35 кВ возникают резонансные явления, которые могут усиливать гармоники сетевого тока ПЧ-АВ и вызывать сильные искажения напряжения на общих секциях главной понизительной подстанции (ГПП) предприятия. Из-за ухудшения качества напряжения на секциях заводской ГПП возможны аварийные ситуации, связанные с аварийными отключениями, а в некоторых случаях и выходами из строя, чувствительных электроприемников, таких как: источники бесперебойного питания устройств промышленной автоматизации, снабберные RC-цепи тиристорных преобразователей, батареи статических конденсаторов без защитных реакторов, а также другие силовые преобразователи в составе электроприводов промышленных механизмов.

Использование существующих технических решений по обеспечению ЭМС мощных электроприводов прокатных станов на базе ПЧ-АВ за счет использования модифицированных алгоритмов широтно-импульсной модуляции (ШИМ) АВ с учетом резонансных явлений, а также использование усовершенствованных систем управления АВ, часто затруднено из-за закрытой структуры систем управления ПЧ-АВ. Применение традиционных фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ) в виде одночастотных фильтров высших гармоник, настроенных на фильтрацию определенной группы гармоник сетевого тока силовых преобразователей, в большинстве случаев не обеспечивает достижение заданного качества напряжения на общих секциях заводской ГПП из-за широкого диапазона высокочастотных гармоник ПЧ-АВ, попадающих в область резонанса ЧХС. Использование широкополосных фильтров высших гармоник и ФКУ специального типа (конвейерный, двухчастотный и т.д.) в ряде случаев обеспечивает достижение необходимого технического эффекта по снижению суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения K_U , но ФКУ данного типа имеют сложную конструкцию, большие массогабаритные показатели и высокую стоимость.

На основании вышеизложенного актуальной задачей является разработка нового способа обеспечения ЭМС мощных электроприводов на базе ПЧ-АВ за счет сдвига частоты резонанса тока в ЧХС в безопасную область, где отсутствует наложение высокочастотных гармоник ПЧ-АВ с помощью специализированного пассивного фильтра (СПФ) – одночастотного фильтра с высокой добротностью (более 1000 о.е.), частота настройки которого соответствует максимуму основного резонанса токов в частотной

характеристике питающей сети. Разрабатываемый СПФ должен иметь более простую силовую схему и меньшую стоимость, чем у вышеуказанных специальных типов ФКУ.

Степень разработанности. В научных исследованиях А.А. Николаева, А.С. Макалова, М.В. Буланова, И.Г. Гилемова, Ю.А. Сычева, А.А. Севостьянова, Ю.В. Шевырева, С.В. Брованова, О.В. Крюкова, О.И. Осипова, И.Л. Коляндра, А.А. Moeini, J.R. Rodriguez, J.Pontt, Y. Wang и др. рассматривались способы решения проблемы обеспечения ЭМС электроприводов прокатных станов на базе ПЧ-АВ с питающей сетью среднего напряжения за счет коррекции систем управления АВ и алгоритмов ШИМ АВ, что не всегда возможно реализовать на практике из-за закрытых систем управлений АВ и ограничений по нагреву тиристорных ключей при увеличении частоты коммутации и числа удаляемых, либо ослабляемых гармоник. При этом альтернативные способы обеспечения ЭМС ПЧ-АВ с питающей сетью за счет применения различных типов ФКУ в условиях наличия резонансных явлений в частотной характеристике сети должным образом не рассмотрены.

Объектом исследования в работе являются системы внутриводского электропитания металлургических заводов с малым производством, включающие в себя протяженные кабельные линии электропередач, а также мощные электроприводы прокатных станов, выполненные на базе ПЧ-АВ.

Предметом исследования является специализированный пассивный фильтр, обеспечивающий изменение ЧХС, в частности, сдвиг основного резонанса тока в безопасную зону, где отсутствуют высокочастотные гармоники сетевого тока мощных ПЧ-АВ в составе электроприводов прокатного стана.

Целью работы является улучшение ЭМС ПЧ-АВ в составе электроприводов клетей прокатных станов с распределительной сетью среднего напряжения системы внутриводского электроснабжения при наличии резонансных явлений за счет использования СПФ.

Для достижения данной цели были определены следующие задачи:

1. Сравнительный анализ структуры системы электроснабжения электроприемников 10 кВ компактных и крупных металлургических предприятий с протяженными кабельными линиями. 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 внутриводской распределительной сети 10 кВ и ПЧ-АВ для исследования эффективности применения СПФ.
4. Разработка и исследование технических решений по коррекции частотной характеристики сети с целью исключения опасных областей резонансов, совпадающих с высокочастотными гармониками мощных ПЧ-АВ, за счет применения СПФ.
5. Разработка новой методики расчета параметров СПФ.
6. Проведение экспериментальных исследований эффективности функционирования СПФ в условиях действующего производства.

Научная новизна:

1. Разработан новый способ обеспечения ЭМС мощных электроприводов с ПЧ-АВ, отличающийся от известных тем, что для улучшения показателей качества электроэнергии во внутриводской 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, отличающаяся от известных тем, что учитывает резонансные явления в питающей сети и позволяет опреде-

лить оптимальные параметры СПФ, обеспечивающие наилучшее качество напряжения в точке общего присоединения заводских электроприемников.

3. Разработана усовершенствованная имитационная модель распределительной сети 10 кВ системы электроснабжения металлургического завода с электроприводами сортового прокатного 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 ценность 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). Результаты диссертации рекомендуются к использованию на других компактных металлургических предприятиях с протяженными кабельными линиями среднего напряжения 6-35 кВ, где функционируют мощные электроприводы прокатных станов на базе ПЧ-АВ.

Методика проведения исследований. В диссертационной работе применялись известные методы имитационного моделирования распределительных сетей СЭС металлургических заводов и электроприводов на базе ПЧ-АВ, которые базируются на основных принципах теории автоматического управления и теории электрических цепей. При исследовании резонансных явлений в электрических сетях и оценке ПКЭ использовались экспериментальные данные, полученные на металлургическом заводе АО «Металлургический завод Балаково». Для обработки экспериментальных данных и составления компьютерной модели исследуемого электротехнического комплекса использовались известные 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, за счет использования СПФ.

2. Новая методика выбора оптимальных параметров СПФ, обеспечивающих наилучшее качество напряжения в точке общего присоединения заводских электроприемников.

3. Усовершенствованная имитационная модель распределительной сети 10 кВ с мощными электроприводами на базе ПЧ-АВ, позволяющая выполнять анализ режимов работы СПФ.

4. Результаты экспериментальных исследований, показывающие эффективность применения СПФ для обеспечения ЭМС мощных электроприводов на базе ПЧ-АВ.

Достоверность полученных результатов, выводов и рекомендаций подтверждается: 1) правомерностью исходных предпосылок и положений; 2) корректным использованием математических и имитационных методов моделирования на ЭВМ; 3) соответствием полученных в работе результатов и результатов, представленных в

научной трудах других авторов по схожей тематике; 4) результатами экспериментальных исследований, полученными на действующем промышленном предприятии АО «Металлургический завод Балаково».

Соответствие диссертации паспорту специальности. Диссертация соответствует следующим пунктам паспорта специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы:

– **по формуле специальности и объекту исследования,** связанными с закономерностями использования электрической энергии, принципами и средствами управления электротехнических комплексов, построенных на базе объектов электроснабжения и электротехнологии (электроприводы прокатных станов на базе преобразователей частоты с активными выпрямителями, фильтрокомпенсирующие устройства) (п.1, п.3, п.4);

– **по области исследований,** в плане разработки алгоритмов эффективного управления электротехническими комплексами в различных режимах работы (обеспечение электромагнитной совместимости ПЧ-АВ за счет сдвига параллельного резонанса тока в частотной характеристике сети в безопасную зону, где нет значимых гармоник, генерируемых ПЧ-АВ, из-за применения в распределительных сетях 6-35 кВ СПФ), а также математического, имитационного и компьютерного моделирования компонентов электротехнических комплексов и систем (разработка имитационных моделей систем внутривзводовского электроснабжения и электроприводов прокатных станов с ПЧ-АВ).

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-ой 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 РФ (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. Опубликовано научная монография и получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пять основных глав, заключения, списка литературы, включающего в себя **126** наименований, 3-х приложений. Основная часть изложена на **192** страницах текста, содержит **111** рисунков, **15** таблиц и приложения объемом **11** страниц. Общий объем – **203** страницы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении рассматриваются важность проблемы, которая решается в диссертационной работе, и её научная оригинальность. Кроме того, описаны цель и задачи диссертационных исследований, показана теоретическая и практическая значимость работы, описана научная новизна исследований, сформулированы основные положения, выносимые на защиту. Отражено соответствие тематике научной специальности. Приведена информация об апробации работы.

В первой главе рассмотрены основные источники и причины возникновения резонансов токов в распределительных сетях 6-35 кВ систем внутривзаводского электроснабжения металлургических заводов с мощными электроприводами с ПЧ-АВ. Описаны существующие способы и рекомендации по обеспечению ЭМС ПЧ-АВ с питающей сетью среднего напряжения.

Проведен анализ существующих конфигураций систем внутривзаводского электроснабжения (СЭС) различных металлургических предприятий. Основное отличие крупного металлургического предприятия от компактного завода заключается в том, что, на крупном предприятии имеется множество различных подстанций глубокого ввода, узловых подстанций, в то время как система электроснабжения компактного завода включает в себя одну главную понизительную подстанцию, которая питает всю нагрузку металлургического предприятия. Типовые схемы электроснабжения крупных и компактных металлургических предприятий приведены на рис. 1.

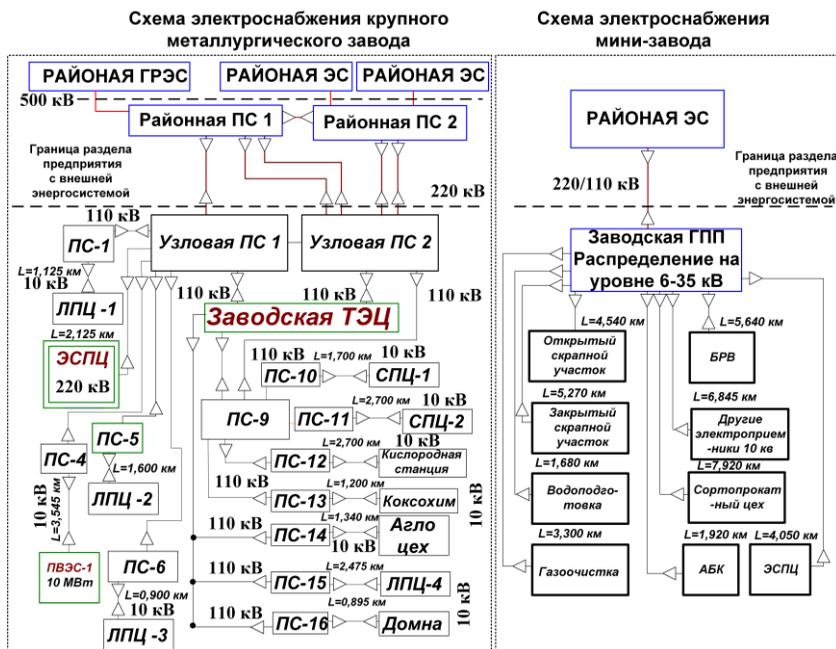


Рис. 1. Классические блок-схемы СЭС крупного металлургического предприятия и компактного мини-завода

Сравнительный анализ параметров СЭС крупного металлургического предприятия и мини-завода представлен в табл. 1. Из таблицы видно, что совокупная длина кабельных линий (КЛ) распределительных сетей среднего напряжения, подключенных к подстанциям крупного и компактного заводов, сильно отличается. Если для крупного предприятия с полным металлургическим циклом с суммарной установленной мощностью электроприемников $P_{УСТ\text{сумм.}} = 0,8-1,5$ ГВт совокупная длина КЛ распределительных сетей среднего напряжения, подключенных к отдельной цеховой подстанции, не превышает 10 км, то в случае компактного металлургического завода с $P_{УСТ\text{сумм.}} < 0,5$ ГВт, суммарная длина КЛ распределительной сети превышает 50 км, что обуславливает их высокую суммарную емкость $C_{КЛ\text{сумм.}}$.

Высокое значение емкости КЛ компактных металлургических заводов в сочетании с индуктивностью сетевых трансформаторов 220 (110) / 10 (6) кВ приводит к появлению в ЧХС резонанса тока, частота которого может совпасть с частотным диапазоном генерирования гармоник ПЧ-АВ в составе мощных электроприводов прокатных станов. При этом СЭС крупных металлургических предприятий обычно имеет несколько цеховых подстанций глубокого ввода. Это исключает появление параллельных резонансов в частотной характеристике сети среднего напряжения в диапазоне частот до 10 кГц, где присутствуют гармоники, генерируемые мощными ПЧ-АВ.

Таблица 1 – Сравнительный анализ параметров СЭС крупного и компактного металлургических заводов

Тип металлургического завода	Особенности системы электроснабжения	Совокупная длина кабельных линий 6-35 кВ $L_{КЛ}$, км	Сумм. распредел. емкость КЛ, $C_{КЛ, СУММ}$, мкФ	$f_{рез}$, Гц
Крупное металлургическое предприятие с $P_{уст. сумм} = 0,8 - 1,5$ ГВт.	Крупные цеха имеют собственную цеховую подстанцию (ПС)	< 8	≈2,05	11900
Компактный металлургический завод с $P_{уст. сумм} < 0,5$ ГВт.	Единственная ГПП 220-110 / 35-6 кВ. Протяженные КЛ.	> 50	≈18,65	2900

На основе анализа научных публикаций был выполнен обзор существующих способов борьбы с резонансными явлениями в электрических сетях среднего напряжения с мощными электроприводами прокатных станов с ПЧ-АВ. Одним из способов борьбы с резонансными явлениями в СЭС среднего напряжения являются усовершенствованные алгоритмы ШИМ с возможностью адаптации к форме ЧХС 6-35 кВ. Суть адаптивных алгоритмов ШИМ АВ заключается в пересмотре подхода к определению углов переключения силовых модулей АВ. Сложность реализации способа обеспечения ЭМС ПЧ-АВ с питающей сетью с помощью адаптации известных алгоритмов ШИМ к ЧХС заключается в ограниченном доступе к алгоритмам контроллеров ШИМ АВ. Также проведен анализ применения известных типов ФКУ, который показал, что использование одночастотных фильтров не обеспечивает достижение заданного качества напряжения на общих секциях заводской ГПП из-за широкого диапазона высокочастотных гармоник ПЧ-АВ, попадающих в область резонанса ЧХС. Применение ФКУ на базе широкополосных, конвейерных, двухчастотных фильтров в некоторых случаях позволяет улучшить качество напряжения в сетях с ПЧ-АВ, но фильтры данного типа имеют сложную конструкцию, большие массогабаритные показатели и высокую стоимость.

На основании выполненного анализа сделан вывод о необходимости разработки нового способа обеспечения ЭМС мощных электроприводов прокатных станов на базе ПЧ-АВ за применения ФКУ нового типа – СПФ на базе одночастотного фильтра с отличными от традиционных фильтров характеристиками, а также необходимости разработки новой методики для расчета параметров данного фильтра.

Вторая глава диссертационной работы посвящена исследованию ПКЭ в распределительной сети 10 кВ СЭС с мощными электроприводами сортового прокатного стана на базе ПЧ-АВ АО «Металлургический завод Балаково» (г. Балаково, Саратовская область).

Особенностью данного завода является наличие одной заводской ГПП 220/35/10 кВ. Она обеспечивает электропитание электросталеплавильного комплекса, электроприемников электросталеплавильного и прокатного комплекса, а также других вспомогательных промышленных установок на участках газоочистки и водоподготовки, скрапного отделения и блока разделения воздуха. Упрощенная схема электроснабжения завода приведена на рис. 2.

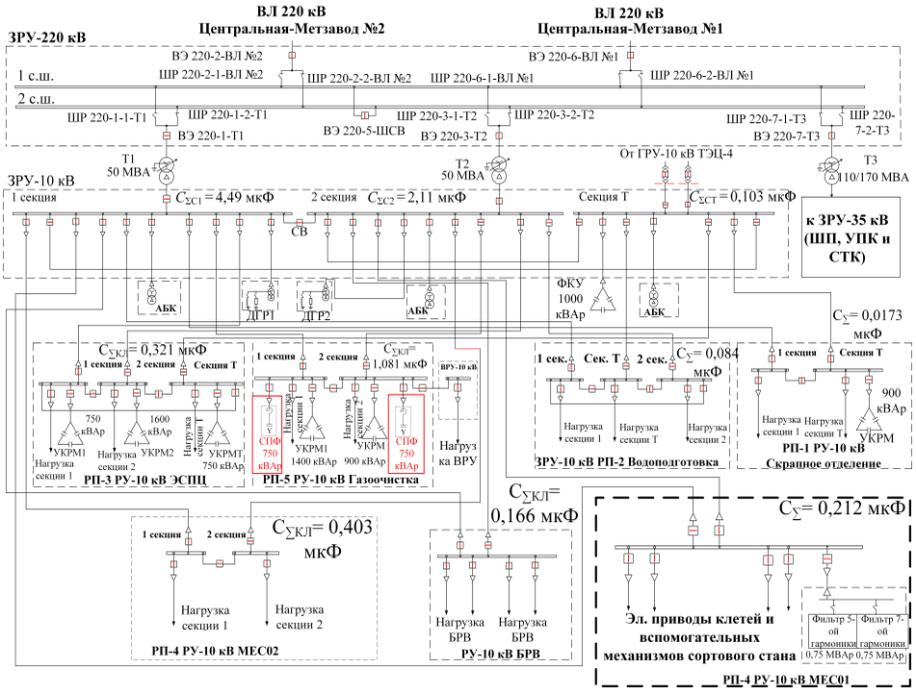


Рис. 2. Схема электроснабжения АО «Металлургический завод Балаково»

На рис. 3 изображена схема цеховой РП-4 (МЕС01) 10 кВ, осуществляющей электроснабжение главных и вспомогательных электроприводов сортового стана. От РП-4 (МЕС01) получают питание электроприводы 18 клеток с двигателями 630 – 1300 кВт с ПЧ фирмы Siemens S120 с групповыми выпрямителями типа Smart, а также электроприводы ножиц и правильной машины мощностью 290 – 600 кВт. Трансформаторы Т15 – Т18 питают ПЧ производства TMEIC TMDrive-70 с мощными асинхронными двигателями 2500 кВт (TMEIC №№1-2) и 6300 кВт (TMEIC №3) скоростных проволочных блоков №№1-3.

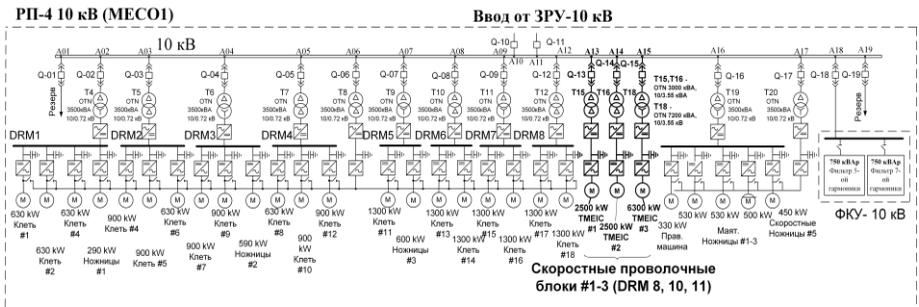


Рис. 3. Схема электроснабжения электроприводов сортового стана

Проведены исследования причин возникновения резонансных явлений во внутривозводской электрической сети металлургического завода. В СЭС на уровне напряжения 10 кВ имеются 3 электроприемника мощностью 2500 кВт х 2 и 6300 кВт – ПЧ-АВ фирмы ТМЕИС в составе электроприводов скоростных проволочных блоков. Указанные преобразователи частоты выполнены на основе активных выпрямителей, в которых используется алгоритм ШИМ с фиксированными углами переключения. Экспериментальные исследования качества электрической энергии в распределительной сети 10 кВ показали, что работа электроприводов проволочных блоков с ПЧ-АВ ТМЕИС 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 11% с расчетом до 150-ой гармоники. В результате чего имели место массовые выходы из строя соседних групповых выпрямительных модулей Siemens Sinamics S120 с технологией Smart, имеющих питание от общих секций заводской ГПП.

В ходе экспериментальных исследований было выявлено, что сильные гармонические искажения напряжения возникают в том случае, когда резонанс токов в распределительной сети 10 кВ совпадает с областью частот генерирования гармоник ПЧ-АВ ТМЕИС 1-3 с номерами $n = 49 - 71$. Установлено, что негативное влияние с показателем $K_U = 10,8\%$ оказывает самый мощный преобразователь ТМЕИС №3, и оно приблизительно соответствует совместному действию двух преобразователей ТМЕИС №1, 2 $K_U = 10,1\%$. Работа только одного преобразователя ТМЕИС №1 оказывает пропорционально меньшее воздействие K_U порядка 5,5%. Показано, что работа на холостом ходу других ПЧ Siemens S120 практически не вносит дополнительных искажений в форму кривой напряжения на секциях 10 кВ.

Анализ экспериментальных осциллограмм токов и напряжений (рис. 4, 5) в распределительной сети 10 кВ показал, что применение ФКУ на базе существующих одночастотных фильтров 5-ой и 7-ой гармоник, не оказывают значимого влияния на качество электроэнергии при наличии резонансных явлений. При наложении резонанса токов в ЧХС на область высокочастотных гармоник (рис. 5 б), генерируемых ПЧ-АВ ТМЕИС, происходит сильное искажение формы тока (рис. 4 а) и напряжения (рис. 5 а). Зная параметры сетевого трансформатора X_T , а также общую длину и суммарную эквивалентную емкость C_{KL} кабельных линий на стороне 10 кВ, можно определить параметры резонанса тока резонансную частоту $\nu = 65,54$ о.е. и $f_{PE3} \approx 3277$ Гц:

$$\nu = \sqrt{\frac{X_{KL}}{X_T}}, \quad (1) \quad X_T = u_K \cdot \frac{U^2}{S_{HT}}, \quad (2) \quad X_{KL} = \frac{1}{\omega \cdot C_{KL}}, \quad (3)$$

где X_T, X_{KL} – индуктивное сопротивление сетевого трансформатора и суммарное емкостное сопротивление кабельных линий; U, ω – напряжение и частота питающей сети; U_K, S_{HT} – напряжение короткого замыкания и мощность сетевого трансформатора 110/10 кВ.

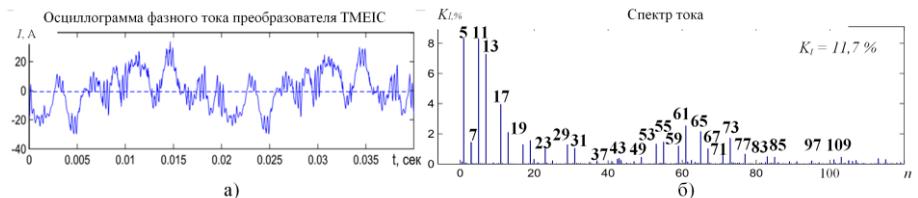


Рис. 4. (а) Осциллограмма фазного тока на шинах 10 кВ РП-4; (б) гистограмма гармоник сетевого тока ПЧ-АВ ТМЕИС

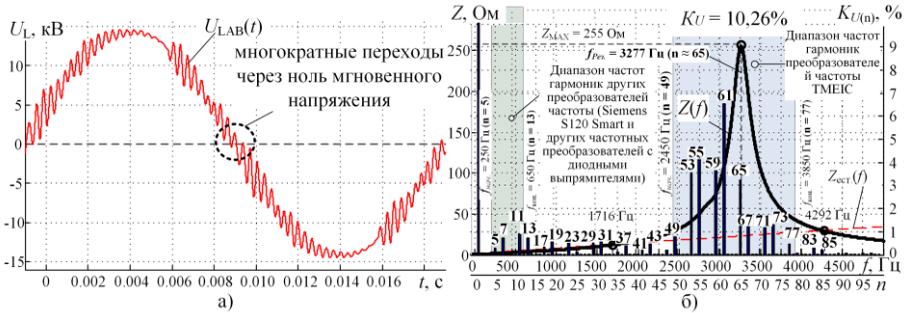


Рис. 5. (а) Осциллограмма мгновенного значения линейного напряжения; (б) Гармонический состав линейного напряжения и ЧХС 10 кВ

В ходе проведения исследований также было определено, что при возникновении сильных искажений на секциях ЗРУ 10 кВ ГПП и РУ-10 кВ РП-4 (МЕСО1) из-за влияния резонансных явлений возникали ситуации выхода из строя соседних ПЧ Siemens S120 с групповыми выпрямительными модулями Smart. Причиной данных аварий являлось нарушение работы блока синхронизации в системе управления выпрямителя Smart из-за наличия в линейном напряжении сети 10 кВ частых переходов через ноль при смене полуволны (рис. 5, а). Это приводило к неправильному формированию управляющих импульсов на силовые ключи выпрямителя и возникновению режима короткого замыкания через два транзистора одной фазы.

Третья глава посвящена разработке комплексной имитационной модели исследуемой системы электроснабжения завода АО «Металлургический завод Балаково» и электроприводов скоростных проволочных блоков сортового стана с ПЧ-АВ, позволяющая выполнять анализ частотных характеристик и ПКЭ в распределительной сети 10 кВ при различных режимах электроснабжения и режимах работы главных электроприводов прокатного стана. Кроме того, модель используется для определения оптимальной конфигурации разрабатываемого СПФ, анализа его режимов работы, а также для предварительной оценки ПКЭ в сети 10 кВ при использовании СПФ.

Имитационная модель была реализована с использованием программной среды Matlab с интегрированным пакетом Simulink (рис. 6). В модели были учтены: 1) параметры питающей сети 220 кВ, 2) сетевых трансформаторов Т1 и Т2 220/10 кВ, 3) всех кабельных линий 10 кВ, отходящих от заводской ГПП до цеховых РП, а также от цеховых РП до конечных электроприемников, 4) имеющихся ФКУ на базе одночастотных фильтров 5-ой и 7-ой гармоник. Также были реализованы модели электроприводов скоростных проволочных блоков на базе ПЧ-АВ ТМЕИС1-3 и соседних электроприводов на базе ПЧ Siemens с групповыми выпрямителями Smart. В модели были воспроизведены существующие схемы ЗРУ-10 кВ ГПП и всех цеховых РП, а также основные конфигурации распределительной сети 10 кВ для двух нормальных режимов электроснабжения электроприемников завода: с отдельным питанием секций ЗРУ-10 кВ ГПП от собственного сетевого трансформатора 220 / 10 кВ и с питанием двух секций ЗРУ-10 кВ от одного трансформатора.

Имитационная модель АВ в составе ПЧ-АВ ТМЕИС1-3 реализована в виде управляемых источников напряжения с системой управления, включающей в себя контуры регулирования напряжения в звене постоянного тока U_{DC} и ортогональной составляющей сетевого тока I_d . В модели системы управления АВ для реализации использу-

мого алгоритма ШИМ с фиксированными углами переключения силовых ключей была реализована таблица углов переключения, восстановленная экспериментально на основе анализа формы мгновенного значения напряжения 3,3 кВ на входе АВ. Также была 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 представлены в модели в виде пассивных активно-индуктивных сопротивлений, воспроизводящих потребление активной и реактивной мощности. Моделирование кабельных линий производилось при помощи П-образных схем замещений (ПИ-секций). Параметры ПИ-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, полученных из кабельных журналов.

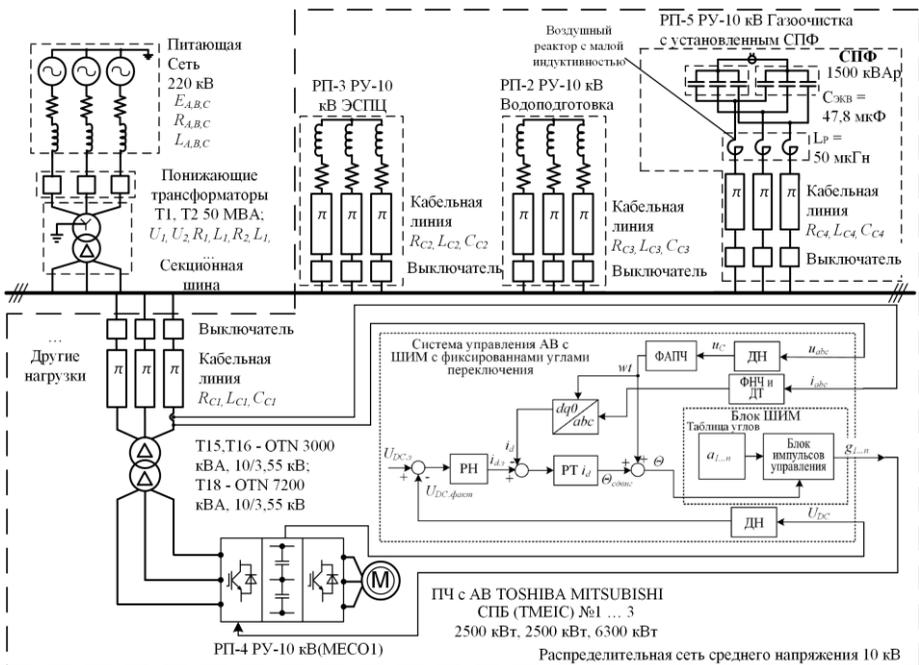


Рис.6. Блок-схема имитационной модели системы электроснабжения электроприемников 10 кВ

С использованием экспериментальных данных была выполнена проверка адекватности имитационной модели, путем сравнения гармонического состава напряжения на секциях 10 кВ, а также формы частотной характеристики, полученных экспериментально и с помощью моделирования (рис. 7). Отклонение расчетного значения суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения K_U на секциях 10 кВ от фактической величины составило менее 2%. Разработанная имитационная модель адекватно воспроизводит ЧХС 10 кВ и гармонический состав сетевого тока ПЧ-АВ ТМЕИС в различных режимах работы, что делает возможным ее использование в дальнейших исследованиях по исключению резонанса и улучшению ЭМС за счет применения СПФ.

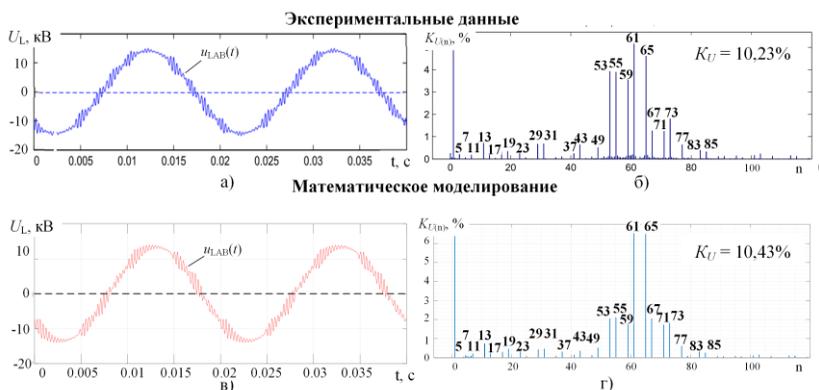


Рис. 7. Проверка адекватности разработанной имитационной модели

В четвертой главе произведена разработка нового способа обеспечения ЭМС за счет сдвига частоты резонанса в частотной характеристике сети в безопасную зону, где отсутствует наложение высокочастотных гармоник сетевого тока ПЧ-АВ. Сдвиг частоты резонанса осуществляется за счет применения СПФ, который представляет собой одночастотный фильтр с высокой добротностью (более 1000 о.е.). Частота настройки СПФ совпадает частотой основного резонанса токов в ЧХС. В СПФ предусматривается применение конденсаторов с пленочным полипропиленовым диэлектриком для обеспечения возможности длительной работы фильтра при повышенных значениях суммарного коэффициента гармонических искажений тока K_U вплоть до 45%. Также представлена разработанная методика расчета параметров СПФ. Методика содержит следующие этапы расчета параметров фильтра:

1. Составление имитационной модели СЭС металлургического предприятия с мощными электроприводами на базе ПЧ-АВ. После чего выполняется проверка адекватности модели с использованием экспериментальных данных, полученных на действующем производстве.

2. На основании разработанной имитационной модели осуществляется выбор места установки и подключения СПФ. Как правило, это секции ЗРУ-10 кВ заводской ГПП или секции ЗРУ-10 кВ одной из цеховых РП, в которой возможно разместить оборудование фильтра.

Для АО «Металлургический завод Балаково» были определены две возможные точки подключения СПФ: 1) на секциях РУ-10 кВ РП-5 «Газоочистка»; 2) на секциях РУ-10 кВ РП-4 МЕСО1. С учетом существующих ограничений по размещению оборудования СПФ был выбран первый вариант с установкой и подключением фильтра в РУ-10 кВ РП-5 «Газоочистка».

3. Далее на модели осуществляется расчет значения коэффициента K_U на секциях ЗРУ-10 кВ заводской ГПП с анализом до 150-ой гармоники при использовании СПФ различной мощности $Q_{СПФ}$ и эквивалентной индуктивности $L_{Э}$, представляющей собой сумму индуктивности воздушного реактора фильтра L_P и суммарной индуктивности КЛ 10 кВ $L_{КЛ}$ от точки подключения СПФ до точки подключения источника высших гармоник (ПЧ-АВ в РУ-10 кВ РП-4 МЕСО1):

$$L_{Э} = L_P + L_{КЛ}. \quad (4)$$

На основании результатов моделирования осуществляется выбор оптимального сочетания параметров СПФ, при которых достигается минимальное значение коэффициента суммарных гармонических искажений напряжений K_U на секциях ГПП.

На рис. 8 представлены результаты определения оптимальных параметров СПФ для СЭС АО «Металлургический завод Балаково». Исследования показали, что наибольшее снижение величины коэффициента K_U с исходных значений 7,8% и 10,23% до уровня 2,1-3,50 % достигается при мощности СПФ в диапазоне от 500 до 1500 кВАр. Для дальнейшего анализа были выбраны два варианта мощности СПФ с приемлемым уровнем $K_U \leq 3\%$ $Q_{СПФ} = 750$ кВАр и 1500 кВАр.

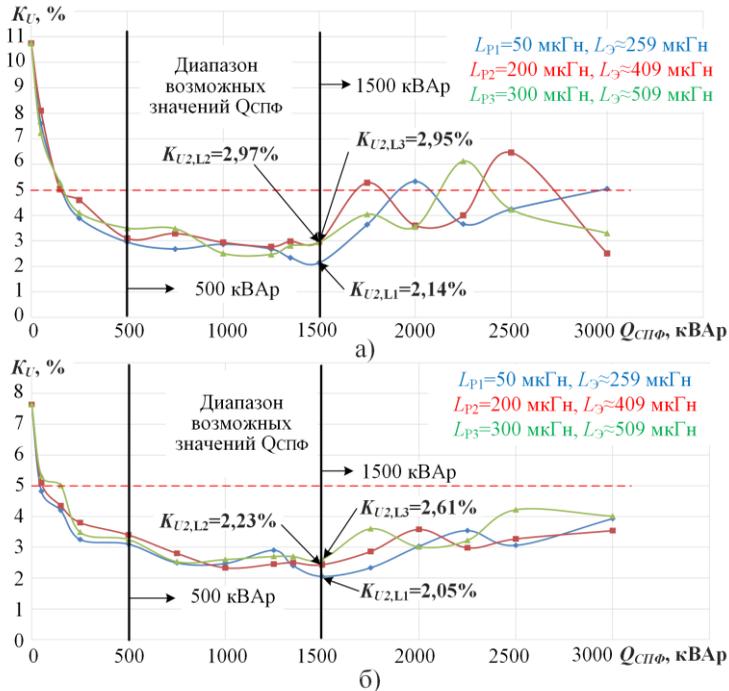


Рис. 8. Сравнение коэффициентов нелинейных искажений напряжения на секциях ЗРУ-10 кВ ГПП в зависимости от мощности СПФ и индуктивности реактора при раздельной работе секций 1 и 2 (режим 1) (а); при совместной работе секций 1 и 2 (режим 2) (б)

В соответствии с рис. 8 для достижения минимального уровня K_U при двух вариантах мощности СПФ величина эквивалентной индуктивности между точками подключения СПФ и ПЧ-АВ должна составлять $L_z = 259$ мкГн. С учетом того, что при установке СПФ в РП-5 «Газоочистка» суммарная индуктивность кабельных линий между СПФ и ПЧ-АВ равна $L_{кЛ} = 209$ мкГн, расчетная индуктивность воздушного реактора согласно выражению (4) составляет $L_p = 50$ мкГн.

4. На следующем этапе для выбранной конфигурации необходимо определить величину тока, протекающего через конденсаторы СПФ, а также коэффициент искажения синусоидальности кривой тока K_I . В ходе проведенных исследований была доказана возможность применения конденсаторных батарей в составе СПФ, способных функционировать при высоких значениях коэффициента K_I до 45 % без перегрева и риска выхода из строя (температура конденсаторов составляла 27 °С в летний период времени в помещении с естественной вентиляцией). Функционирование конденсаторов СПФ при

$K_I \geq 45\%$ является нежелательным, поскольку это может привести к перегреву конденсаторных батарей и выходу фильтра из строя.

Результаты анализа значения коэффициента K_I для двух вариантов мощности СПФ $Q_{СПФ} = 750$ кВАр и 1500 кВАр представлены на рис. 9. В первом случае при использовании СПФ с мощностью 750 кВАр и индуктивностью воздушного реактора $L_p = 50$ мкГн значение коэффициента K_I имеет недопустимый уровень 61,37%. Во втором случае при мощности фильтра 1500 кВАр и $L_p = 50$ мкГн значение $K_I = 38,8\%$ является приемлемым.

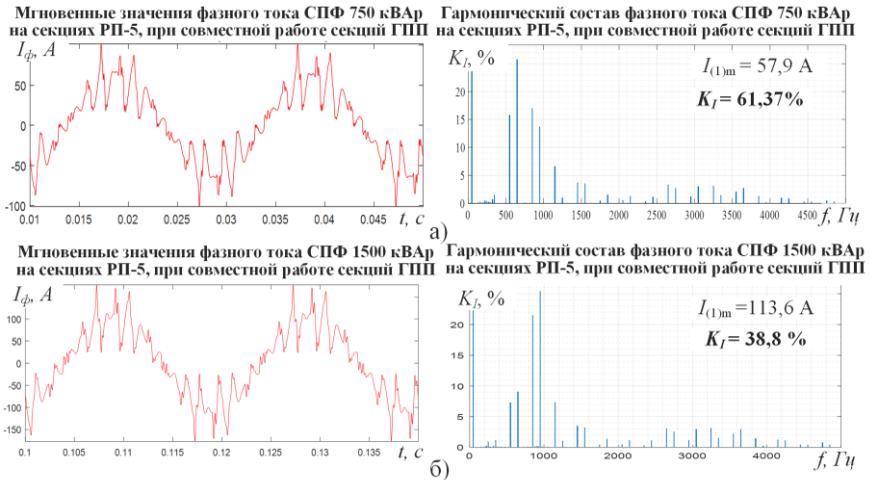


Рис. 9. Мгновенные значения и гармонический состав фазного тока СПФ для двух вариантов мощности фильтра $Q_{СПФ} = 750$ кВАр (а) и 1500 кВАр (б)

5. На последнем этапе выполняется анализ величины броска тока и уровня перенапряжений при включении СПФ с выбранными параметрами.

Необходимо отметить, что из-за использования в СПФ воздушных реакторов с малой индуктивностью $L_p = 50-300$ мкГн, а также высокой емкости батарей конденсаторов, при включении фильтра могут возникать броски емкостного тока большой амплитуды, вызывающие кратковременные перенапряжения в сети 10 кВ. В ряде случаев данные броски тока и перенапряжения могут нарушать режимы работы других чувствительных электроприемников в СЭС завода, а также вызывать ложные срабатывания устройств релейной защиты и автоматики (РЗА). Исходя из особенностей настройки токовых защит в существующих устройствах РЗА в СЭС АО «Металлургический завод Балаково», а также допустимому уровню перенапряжения в сети 10 кВ, не оказывающему сильного негативного влияния на работу чувствительных электроприемников завода, были определены граничные значения амплитуды броска тока $I_{m,max} = 4I_{m,ном}$ и напряжения сети $U_{m,max} = 1,1U_{m,ном}$.

Дополнительный анализ величины броска тока и уровня перенапряжений при включении СПФ необходимо проводить для оптимальных конфигураций фильтра, которые успешно прошли проверку на минимальные коэффициенты K_U и K_I . На рис. 10 приведены переходные процессы напряжения и тока при включении СПФ мощностью 1500 кВАр. Исследования показали, что в зависимости от начальной фазы питающего напряжения при включении СПФ возникают кратковременные броски емкостного тока вели-

чиной до $I_{m.max.} = 3,82I_{m.ном.}$, вызывающие кратковременное повышение напряжения на секциях ЗРУ-10 кВ ГПП до $1,09U_{m.ном.}$. Время затухания броска тока при текущей эквивалентной нагрузке электроприемников, подключенных к двум секциям ЗРУ-10 кВ ГПП, составляет $t_{затух.} = 10$ мс. Данные значения броска тока и перенапряжения являются приемлемыми и не оказывают негативного воздействия на режимы работы других электроприемников завода, а также на функционирование токовых защит в устройствах РЗА.

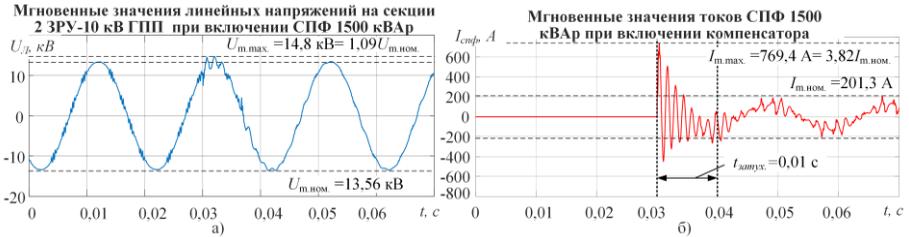


Рис. 10. Переходные процессы при включении СПФ 1500 кВАр с $L_p=50$ мкГн (момент включения соответствует максимуму одного из $U_{л}$)

Пятая глава диссертации посвящена экспериментальным исследованиям эффективности применения СПФ в СЭС АО «Металлургический завод Балаково».

На основании разработанных рекомендаций по установке СПФ в СЭС АО «Металлургический завод Балаково» были изготовлены и внедрены в эксплуатацию два СПФ суммарной мощностью 1500 кВАр. Использование двух комплектов СПФ по 750 кВАр было обусловлено ограничениями по размещению фильтров в РП-5 «Газоочистка», а также наличием подходящих конденсаторных батарей и воздушных реакторов у компании-производителя оборудования ENERLUX POWER s.r.l.. Параметры установленных СПФ приведены в табл. 2. Силовая схема и фотография одного фильтра мощностью 750 кВАр приведены на рис. 11, а и б.

Таблица 2 - Технические данные установленных СПФ для коррекции ЧХС 10 кВ

Параметр	Значение параметра
1. Номинальное напряжение, кВ	10,0
2. Номинальная мощность СПФ, кВАр	2x750
3. Емкость батарей конденсаторов на фазу, мкФ	3 x 23,9
3. Индуктивность реактора 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.
7. Уровень изоляции электрооборудования, кВ	38/95 кВ
8. Тип используемых конденсаторов	Материал: два тонких алюминиевых листа. Диэлектрик: полипропиленовая пленка. Тип изоляционной жидкости: биоразлагаемое масло. Тип изоляторов: фарфор;

Для обеспечения надежной работы СПФ в условиях высокого значения K_I (вплоть до 45 %) были использованы конденсаторы с пленочным полипропиленовым диэлектриком.

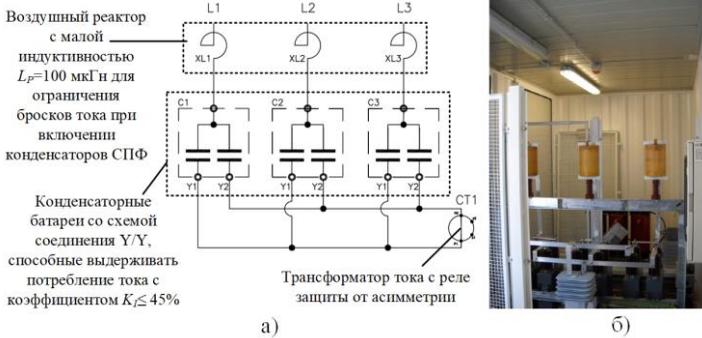


Рис. 11 Силовая схема (а) и фотография (б) СПФ, рекомендованных к установке в РУ-10 кВ РП-5 «Газоочистка», для коррекции ЧХС 10 кВ

На рис. 12 приведены экспериментальные осциллограммы мгновенных значений напряжения на секции ЗРУ-10 кВ ГПП, полученные в ходе проведения эксперимента по оценке эффективности коррекции частотной характеристики с помощью СПФ и улучшению ЭМС электроприводов на базе ПЧ-АВ ТМЕИС1-3. Частотные характеристики для каждого из рассматриваемых режимов приведены на рис. 13. В первом случае при отсутствии СПФ в сети 10 кВ возникает резонанс токов на частотах, соответствующих области генерирования высших гармоник ПЧ-АВ (рис. 13, а), что приводит к сильному искажению формы напряжения. В данном случае на рис. 12, а и б показаны кривая напряжения и ее гармонический состав при работе ПЧ-АВ в исходном режиме. После включения двух СПФ с суммарной мощностью 1500 кВАр резонанс токов смещается в область низкочастотных гармоник (рис. 13, б), что приводит к значительному улучшению гармонического состава напряжения и снижению коэффициента K_U (рис. 12 в, г).

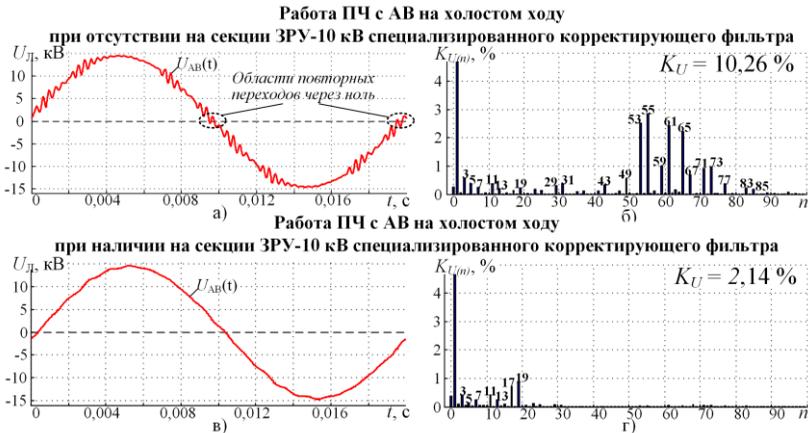


Рис. 12. Результаты экспериментальных исследований эффективности коррекции ЧХС и снижения коэффициента K_U напряжения сети 10 кВ за счет использования СПФ

За счет значительной емкости конденсаторов в составе фильтров происходит коррекция частотной характеристики сети. В результате изменения этой характеристики работа ПЧ-АВ уже не оказывает большого негативного влияния на кривую напряжения на секциях

ГПП, качество формы которого можно охарактеризовать как удовлетворительное. Обобщенные результаты экспериментальной оценки изменения суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения K_U на секциях заводской ГПП приведены в табл. 3.

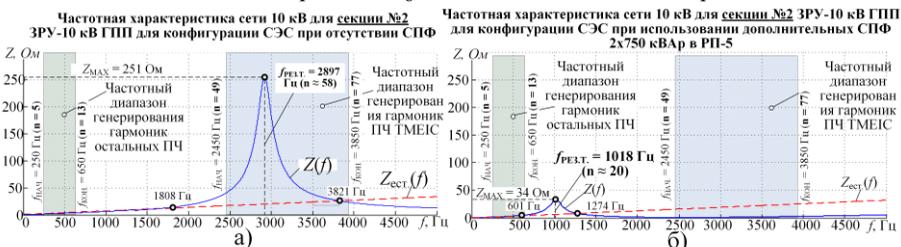


Рис. 13. Анализ ЧХС 10 кВ заводской СЭС при раздельной работе секций №1 и №2 ЗРУ-10 кВ ГПП для исходных режимов без использования СПФ (а) и при использовании двух СПФ суммарной мощностью 1500 кВАр (б)

Таблица 3 – Результаты сравнения суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения на секциях ЗРУ-10 кВ ГПП при использовании дополнительных СПФ 2х750 кВАр

Режимы работы двух СПФ суммарной мощностью 1500 кВАр при заданной конфигурации сети 10 кВ внутриводской СЭС	K_U , %	Изменение δK_U , %
Раздельная работа секций 1 и 2 ЗРУ-10 кВ заводской ГПП		
Режим 1. Все компенсирующие устройства ФКУ1,2 (фильтры 5-ой и 7-ой гармоник), имеющие связь с секциями №1 и №2 ЗРУ-10 кВ, отключены, включая СПФ на РП-5	10,26	–
Режим 2. На РП-5 «Газоочистка» включены дополнительные СПФ 2х750 кВАр.	2,90	-71,7 % (3,53 раза)
Режим 3. Включены СПФ 2х750 кВАр в РП-5 и ФКУ №1,2 в РП-4 МЕСО1	2,70	-74,6% (3,8 раза)
Совместная работа секций 1 и 2 ЗРУ-10 кВ заводской ГПП		
Режим 4. Все компенсирующие устройства ФКУ1,2, имеющие связь с секциями №№1-2 ЗРУ-10 кВ, отключены, включая СПФ на РП-5.	7,80	
Режим 5. Включены СПФ 2х750 кВАр в РП-5 «Газоочистка»	2,33	-70,1% (3,34 раза)
Режим 6. Включены СПФ 2х750 кВАр в РП-5 и ФКУ №1,2 в РП-4 МЕСО1	2,14	-72,6% (3,64 раза)

Необходимо отметить, что установка двух СПФ в СЭС АО «Металлургический завод Балаково» обеспечило надежную работу главных электроприводов сортового стана и других чувствительных электроприемников предприятия. При уровне суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения K_U менее 3% с расчетом до 150-ой гармоники аварийных ситуации выхода из строя преобразователей частоты Siemens Sinamics S120 прекратились.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИИ

1. Проведен сравнительный анализ структур систем электроснабжения электроприемников 10 кВ компактных и крупных металлургических предприятий. Показана отличительная особенность распределительных сетей среднего напряжения СЭС мини-заводов, заключающаяся в большой протяженности КЛ с высоким эквивалентным значением емкости, что приводит к возникновению резонанса токов в ЧХС, частота которого может совпадать с диапазоном высокочастотных гармоник мощных ПЧ-АВ. В этом случае имеют место сильные гармонические искажения напряжения питающей сети, приводящие к аварийным отключениям и выходам из строя чувствительных электроприемников.

2. Проведены экспериментальные исследования показателей качества электроэнергии в промышленных электрических сетях с мощными электроприводами на базе ПЧ-АВ на примере АО «Металлургический завод Балаково», которые показали наличие сильных гармонических искажений напряжения при работе мощных ПЧ-АВ ТМЕИС в составе электроприводов клеток сортового стана из-за влияния резонанса токов в ЧХС.

3. 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.

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

5. Разработана новая методика выбора параметров СПФ, учитывающая резонансные явления в питающей сети и позволяющая определить оптимальные параметры СПФ. Методика включает в себя: 1) составление имитационной модели системы внутривзаводского электроснабжения и модели ПЧ-АВ; 2) определение мощности и индуктивности воздушного реактора СПФ с использованием оптимального критерия – минимального значения коэффициента K_U на секциях ГПП, рассчитанного до 150 гармоники; 3) проверку уровня суммарного коэффициента гармонических составляющих тока K_I СПФ; 4) проверку уровня броска тока и напряжения в сети 10 кВ при включении СПФ.

6. Внедрение двух СПФ суммарной мощностью 1500 кВАр на АО «Металлургический завод Балаково» показало эффективность предложенной методики. Относительное изменение коэффициента K_U на секциях заводской ГПП составило $\delta K_U = 70,1-74,6\%$ (уменьшение в 3,3 – 3,8 раза до уровня $K_U \leq 3\%$). Применение СПФ позволило обеспечить нормальную работу чувствительных электроприемников предприятия, получающих питание от общих секций заводской ГПП.

7. Разработанный способ обеспечения ЭМС ПЧ-АВ с питающей сетью среднего напряжения за счет применения СПФ рекомендуются к использованию на других компактных металлургических предприятиях с протяженными КЛ 6-35 кВ, где функционируют мощные электроприводы прокатных станов на базе ПЧ-АВ.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

Научные статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Николаев, А.А. Повышение качества электроэнергии в системах электроснабжения прокатных станов 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

2. 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.

3. Николаев, А.А. Разработка усовершенствованного алгоритма ШИМ активного выпрямителя с адаптацией к резонансным явлениям во внутривзаводской 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.

Публикации в изданиях, входящих в систему цитирования Scopus

4. 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 Over-

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

5. 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.

6. 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.

7. 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.

8. Nikolaev, A. A. New Methodology for Calculation of the Special Passive Filter Parameters with the Aim of Voltage Quality Improving in Networks with Active Rectifier / 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.

Публикации в материалах международных конференций

9. 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.

10. 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.

Публикации в других периодических изданиях

11. Николаев, А.А. Исследование резонансных явлений в распределительных электрических сетях среднего напряжения систем внутривзводского электроснабжения промышленных предприятий / А. А. Николаев, Т. Р. Храшкин, **М. Ю. Афанасьев**. // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. - 2017. - № 4. – С. 51-62, doi: 10.24892/RJSE/20170401

12. 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.

Программы для ЭВМ

13. 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.

Научные монографии

14. 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.**, Ивекев В.С., Денисевич А.С. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2022. – 396 с. – ISBN 978-5-9967-2622-6.