

На правах рукописи



БУЛАНОВ МИХАИЛ ВИКТОРОВИЧ

**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

Магнитогорск – 2022

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:

Шевырёв Юрий Вадимович

доктор технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет МИСиС», профессор кафедры энергетики и энергоэффективности горной промышленности, (г. Москва)

Маклаков Александр Сергеевич

кандидат технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», доцент кафедры электропривода, мехатроники и электромеханики, (г. Челябинск)

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», (г. Липецк)

Защита состоится «15» сентября 2022 г. в 15 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.111.04 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 ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» и на официальном сайте <http://magtu.ru/>.

Автореферат разослан «___» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.111.04
канд. техн. наук, доцент

Одинцов Константин Эдуардович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

За последние десятилетия на крупных промышленных предприятиях образовался новый класс технических систем, включающих три главных компонента: питающую сеть, многоуровневый преобразователь частоты (ПЧ) с активным выпрямителем напряжения (АВ) и регулируемый электропривод переменного тока большой мощности. Они являются примером использования последних научно-технических достижений в области электротехники и электроники, обладающих рядом существенных преимуществ с точки зрения эффективности преобразования и потребления электрической энергии, а именно: 1) возможностью рекуперации энергии в питающую сеть в тормозных режимах электропривода; 2) возможностью поддержания единичного коэффициента мощности в точке подключения активного выпрямителя к питающей сети; 3) улучшением гармонического состава потребляемого тока в диапазоне низких и средних частот за счет применения модифицированных алгоритмов широтно-импульсной модуляции (ШИМ) АВ с удалением или подавлением выделенных гармоник. Однако, опыт эксплуатации данных силовых преобразователей ПЧ-АВ выявил некоторые недостатки, из которых наиболее существенным является высокая вероятность сильного ухудшения качества напряжения во внутриводской распределительной электрической сети 6-35 кВ из-за наложения высокочастотных гармоник входного напряжения и тока АВ на резонансные области частотной характеристики питающей сети.

Проблема ухудшения качества гармонического состава напряжения во внутриводской сети 6-35 кВ при использовании мощных ПЧ-АВ заключается в том, что при определенной конфигурации создаются условия возникновения резонанса токов в определенном частотном диапазоне. Параллельные ветви резонанса образует индуктивность рассеяния сетевых трансформаторов 110/10 кВ и распределенные емкости кабельных линий. Высшие гармоники тока среднего и высокого частотного диапазонов, потребляемые ПЧ-АВ, могут попадать в данные резонансные области, что приводит к усилению высших гармоник напряжения с аналогичными номерами на секциях 6-35 кВ главной понизительной подстанции (ГПП), являющихся точкой общего присоединения внутриводских электроприемников. Необходимо отметить, что создание «грязной» и «чистой» секций в распределительных устройствах (РУ) 6-35 кВ ГПП с выведением мощных нелинейных нагрузок на отдельное питание от «грязной» секции не всегда представляется возможным из-за ограничений в существующей конфигурации РУ среднего напряжения ГПП.

Несмотря на большое количество научных трудов в области повышения эффективности современных ПЧ-АВ, проблема обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) силовых преобразователей данного типа раскрыта не полностью. Разрабатываемые модифицированные алгоритмы ШИМ в тандеме с применяемыми классическими фильтрокомпенсирующим устройствами часто не обеспечивают достижение необходимого технического эффекта по поддержанию заданного качества напряжения в системах внутриводского электроснабжения из-за наличия сложных резонансных явлений в частотных характеристиках сети 6-35 кВ. Результаты теоретических и экспериментальных исследований эффективности работы мощных электрических приводов на базе ПЧ-АВ в условиях действующего производства при наличии резонансных явлений в питающей сети в научной литературе отражены крайне слабо. На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что в настоящее время существует комплексная проблема обеспечения ЭМС мощных электроприводов промышленных механизмов на базе ПЧ-АВ с питающей сетью 6-35 кВ, одним из решений которой может стать изменение

таблиц переключения ШИМ АВ для адаптации резонансным явлениям во внутриводской сети.

Степень разработанности. Исследования применения алгоритмов ШИМ АВ, влияющие работы АВ на питающую сеть, а также проблема возникновения резонансных явлений в сетях промышленных предприятий отражены в трудах отечественных и зарубежных ученых: А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, Ю. В. Шевырѐв, А.С. Маклаков, М.А. Дыбко, С.В. Брованов, Г.С. Зиновьев, Р.Т. Шрейнер, J. Rodriguez, H. Abu-Rub, I.L. Jose, B. W., D.G. Holmes, J. Holtz, B. Wu, Dehong Xu, Yangfan Zhang и других.

Объектом исследования является электротехнический комплекс «система электропитания промышленного предприятия – мощные электроприводы производственных механизмов на базе ПЧ-АВ. **Предметом исследования** является система управления активных выпрямителей в составе ПЧ-АВ мощных электроприводов производственных механизмов.

Целью диссертационной работы является улучшение электромагнитной совместимости промышленных электроприводов большой мощности на базе ПЧ-АВ с распределительной сетью среднего напряжения 6-35 кВ системы внутриводского электроснабжения за счет применения усовершенствованной методики определения оптимальных параметров ШИМ АВ, учитывающей резонансные явления в питающей сети.

Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

1. Экспериментальные исследования режимов работы электроприводов большой мощности с ПЧ-АВ на действующих промышленных предприятиях. Экспериментальные и теоретические исследования существующих алгоритмов ШИМ, применяемых для активных выпрямителей. Экспериментальные исследования качества электроэнергии во внутриводских электрических сетях с мощными электроприводами на базе ПЧ-АВ.

2. Разработка имитационных моделей системы внутриводского электроснабжения и электроприводов с ПЧ-АВ для исследования качества напряжения на общих секциях заводской подстанции 6-35 кВ при наличии резонансных явлений в частотной характеристике сети 6-35 кВ.

3. Разработка способа выявления резонансов во внутриводской сети 6-35 кВ промышленного предприятия за счет формирования специальных тестовых воздействий со стороны ПЧ-АВ, функционирующих в данной сети, обеспечивающего повышение точности определения резонансной области в частотной характеристике.

4. Разработка усовершенствованной методики определения оптимальных параметров алгоритма ШИМ АВ с учетом резонансных явлений в питающей сети среднего напряжения 6-35 кВ. Главным критерием разрабатываемой методики является минимизация высших гармоник тока АВ, попадающих на резонансную область в частотной характеристике питающей сети. Этим достигается улучшение гармонического состава напряжения на общих секциях главной понизительной подстанции предприятия, от которой получают питание различные группы электроприемников, в том числе, чувствительные к ухудшению качества электроэнергии.

5. Экспериментальное исследование эффективности предложенного способа обеспечения электромагнитной совместимости ПЧ-АВ с питающей сетью при использовании алгоритмов ШИМ с оптимальными параметрами на действующем оборудовании стана холодной прокатки ППП ХП ЧерМК ПАО «Северсталь».

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Получены новые результаты экспериментальных исследований, доказывающие негативное влияние резонансных явлений на качество напряжения в системах внутриводского электроснабжения с мощными электроприводами на базе ПЧ-АВ.

2. Разработана усовершенствованная методика определения оптимальных параметров алгоритма ШИМ АВ, отличающаяся от известных возможностью создания таблиц углов переключения вентилей АВ для адаптации к резонансам в частотной характеристике сети 35 кВ.

3. Разработан новый способ выявления резонансов во внутривародской сети 6-35 кВ отличающийся от известных тем, что в его основе лежит использование специализированных тестовых воздействий со стороны мощных ПЧ-АВ на питающую сеть.

4. Разработана новая имитационная модель системы внутривародского электроснабжения и электроприводов с ПЧ-АВ, отличающаяся от известных возможностью исследования резонансных явлений в сети и влияния работы ПЧ-АВ на качество напряжения на общих секциях 6-35 кВ ГПП предприятия.

Практическая ценность и реализация работы заключается в решении существующих производственных проблем по обеспечению заданного качества электроэнергии во внутривародских электрических сетях с мощными электроприводами на базе ПЧ-АВ за счет использования новой методики определения оптимальных параметров ШИМ АВ для адаптации к резонансным явлениям в питающей сети 6-35 кВ, что подтверждается результатами внедрения на действующем оборудовании четырехклетьевого стана холодной прокатки предприятия ЧерМК ПАО «Северсталь». Технический эффект достигается за счет снижения амплитуд гармоник, потребляемых ПЧ-АВ главных электроприводов стана, в резонансной области частотной характеристики питающей сети, что позволяет снизить суммарный коэффициент гармонических искажений напряжения K_U , % на секциях ГПП на 19,7-82,3%, в зависимости от режима работы стана и режима электроснабжения ГПП, а также снизить значение коэффициентов $K_{U(n)}$ n -ых гармонических составляющих напряжения до приемлемого уровня в соответствии с ГОСТ 32141-2013.

Методика проведения исследований. В основу теоретических исследований легли базовые положения теории электропривода, силовой электроники, теории автоматического управления и электроснабжения, известные методы математического и имитационного моделирования систем электроснабжения промышленных предприятий с распределительными сетями 6-35 кВ, а также трехуровневых преобразователей частоты с активными выпрямителями среднего напряжения. Для разработки имитационных моделей использовалась программная среда Simulink в составе пакета Matlab, в котором интегрированы основные численные методы решения дифференциальных уравнений. При проведении теоретических исследований также использовались экспериментальные осциллограммы мгновенных значений напряжений и токов, полученные на ГПП-2 ЧерМК ПАО «Северсталь» и распределительных устройств четырехклетьевого стана ППП ХП с использованием регистраторов электрических сигналов РЭС-3, NI USB-6251 и ELSPEC G4420, с частотой дискретизации до 100 кГц.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты экспериментальных исследований качества напряжения во внутривародских сетях промышленных предприятий, доказывающие негативное влияние резонансных явлений в сетях среднего напряжения при работе мощных электроприводов с ПЧ-АВ.

2. Усовершенствованная методика определения оптимальных параметров ШИМ АВ для адаптации таблиц углов переключения вентилей АВ в зависимости от расположения резонансных областей в частотной характеристике сети 6-35 кВ.

3. Новый способ выявления резонансов во внутривародской сети 6-35 кВ с использованием специализированных тестовых воздействий со стороны мощных ПЧ-АВ, позволяющие более точно определить резонансные области в частотной характеристике сети.

4. Комплексная имитационная модель системы внутривозовского электроснабжения и электроприводов на базе системы ПЧ-АВ с возможностью исследования резонансных явлений в сети и влияния работы ПЧ-АВ на качество напряжения на общих секциях заводской подстанции 6-35 кВ.

5. Результаты экспериментальных исследований качества напряжения в электрической сети 10 кВ района ГПП-2 ЧерМК ПАО «Северсталь», доказывающие эффективность разработанной методики определения оптимальных параметров ШИМ.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается 1) правомерностью исходных положений и предпосылок; 2) корректным применением математических и имитационных методов моделирования; 3) соответствием результатов исследования результатам, опубликованным в научной литературе по схожей тематике другими авторами; 4) экспериментальными данными и достигнутым техническим эффектом, полученным от внедрения результатов диссертационного исследования в действующее производство на базе ПЧ-АВ главных электроприводов четырехклетьевого стана ППП XII ЧерМК ПАО «Северсталь».

Соответствие паспорту научной специальности. Проблематика, рассмотренная в диссертации, соответствует пунктам 1,3,4 паспорта научной специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы: п.1. Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение систем изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем; п.3. Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов энергоэффективного управления; п.4. Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях).

Апробация результатов диссертационной работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на 5 международных конференциях, в том числе: 2021 18th International Scientific Technical Conference Alternating Current Electric Drives (ACED) (г. Екатеринбург, 2021); 2020 Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI) (г. Магнитогорск, оз. Банное, 2020); 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) (г. Сочи, 2020); 2019 Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI) (г. Магнитогорск, оз. Банное, 2019); 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) (г. Сочи, 2019).

В 2020-2021 гг. исследования выполнялись в рамках государственного задания (научный проект №FZRU-2020-0011) по теме «Разработка и исследование алгоритмов энергоэффективного управления электротехническими и технологическими комплексами горно-металлургической отрасли».

В 2020-2021 гг. результаты диссертации использовались при выполнении научно-исследовательской работы «Исследование электрической сети 10 кВ внутривозовского электроснабжения ЧерМК ПАО «Северсталь». Разработка мероприятий, направленных на обеспечение электромагнитной совместимости преобразователей частоты четырехклетьевого стана с питающей сетью 10 кВ ГПП-2 ПАО «Северсталь» (договор №9000112665 от 19.10.2020 г.)

Публикации. По содержанию диссертации опубликовано **10** научных трудов, в том числе **2** статьи в изданиях, входящих в перечень рекомендованных ВАК РФ, **5** статей в изданиях, индексируемых Scopus, получено **2** свидетельства о регистрации программы для ЭВМ, опубликована **1** научная монография.

Структура и объем работы. Структура диссертации включает в себя введение, пять глав, заключение и список литературы из **117** наименований. Работа изложена на **152** страницах основного текста, содержит **100** рисунков, **17** таблиц и приложения объемом **19** страницы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение посвящено описанию актуальности решаемой проблемы и её научной новизне. Помимо этого, во введении намечены цели и задачи, показана теоретическая и практическая значимость выполненной работы.

В первой главе проведен анализ состояния современных автоматизированных электроприводов промышленных механизмов на базе ПЧ-АВ, существующих способов обеспечения электромагнитной совместимости ПЧ-АВ с питающей сетью, а также применяемых алгоритмов ШИМ АВ.

К современным электроприводам промышленных механизмов, где широко используются ПЧ-АВ, относятся, в том числе, главные приводы прокатных станов с синхронными и асинхронными двигателями среднего напряжения. Применение ПЧ-АВ позволяет повысить энергоэффективность электроприводов за счёт рекуперации тормозной энергии в питающую сеть и возможности работы с единичным коэффициентом мощности. Современные ПЧ-АВ выполняются на базе полностью запираемых полупроводниковых элементов (IGCT-тиристоры, IEGT и IGBT-транзисторы). По своей структуре активный выпрямитель аналогичен автономному инвертору напряжения. Для улучшения гармонического состава токов и напряжений широкое распространение в мощных приводах среднего напряжения получили трехуровневые АВ, работа которых представляет собой синтез амплитудной и широтной импульсной модуляции, за счёт создания 3-х уровней напряжений в звене постоянного тока.

Реализация типичной системы управления трехуровневым АВ осуществляется с учетом симметричной системы питающих напряжений, идеальной синхронизации с сетью и балансе напряжений на каждом конденсаторе в звене постоянного тока относительно нейтральной точки преобразователя. Система управления АВ преобразователя реализуется на базе типовой системы векторного управления во вращающейся системе координат $dq0$, с ориентацией по вектору напряжения питающей сети. Система регулирования выполняется двухконтурной: внешний - контур регулирования напряжения в звене постоянного тока U_{DC} ; внутренний - контур регулирования тока преобразователя по осям I_d и I_q . В конечном итоге система управления формирует коэффициент модуляции m , определяющий амплитуду первой гармоники тока, потребляемого АВ, и угол управления θ , определяющий сдвиг между током и напряжением на входе АВ. Эти сигналы управляют блоком ШИМ, формирующем импульсы управления вентилями АВ. На рис.1 приведена упрощенная структурная схема контуров регулирования тока и напряжения, а также силовая схема трехуровневого АВ.

Для улучшения гармонического состава потребляемого тока, а также для ограничения бросков тока при коммутации вентилях, на входе АВ часто устанавливается L-C-L фильтр. ПЧ-АВ большой мощности часто выполняют многопульсными (12, 18, 24 пульсации за период питающего напряжения), тем самым оставляя в гармоническом ряде напряжения АВ гармоники с номерами $Pn \pm 1$, где P – число пульсаций. Также для обеспечения ЭМС ПЧ-АВ с питающей сетью на стадии проектирования на ГПП предприятия может быть

организована «грязная» секция, к которой подключаются электроприводы с ПЧ-АВ и другие, нечувствительные к качеству напряжения, электроприёмники. Ещё одним способом обеспечения ЭМС может быть применение специальных фильтров, состоящих из емкостных элементов, которые обеспечивают смещение резонансной области в низкочастотную область и уменьшение экстремума частотной характеристики сети.

Отличительной особенностью ПЧ-АВ среднего напряжения является относительно низкая частота ШИМ модуляции (150-750 Гц), что вынуждает применять специальные алгоритмы ШИМ для улучшения гармонического состава потребляемого тока. В зависимости от производителя в ПЧ-АВ в основном применяются следующие алгоритмы ШИМ: 1) ШИМ с фиксированными углами переключения вентилях Fixed Pulse Pattern Control (FPPC) (преобразователи фирмы Toshiba Mitsubishi); 2) ШИМ с удалением или ослаблением выделенных гармоник - Selective Harmonic Elimination (SHE) или Selective Harmonic Mitigation (SHM) (преобразователи фирм ABB, Converteam, Danieli).

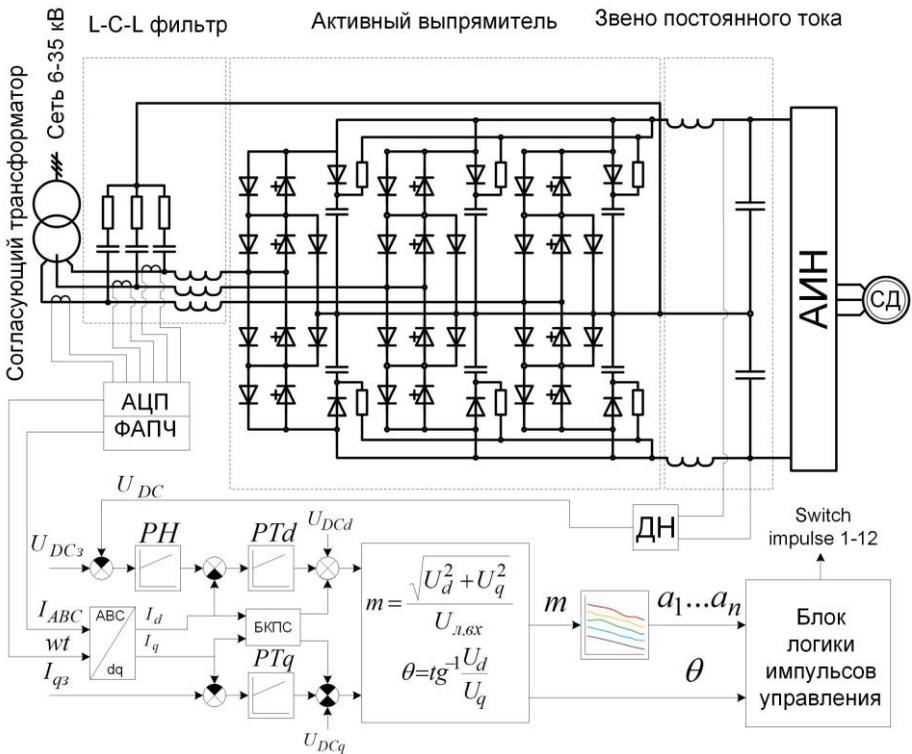


Рис. 1. Структурная схема контуров регулирования тока и напряжения системы управления и силовая схема трехуровневого АВ

При использовании FPPC регулирование напряжения в звене постоянного тока осуществляется сдвигом угла θ , при этом углы включения вентилях не меняются, благодаря чему гармонический состав тока на входе АВ мало зависит от режима работы ПЧ-АВ. При этом углы переключения подобраны таким образом, что суммарный коэффициент гармонического искажения напряжения K_U вплоть до 40-й гармоники минимален. При использовании SHE из гармонического ряда напряжения АВ удаляются некоторые

заданные гармоники во всём диапазоне коэффициента модуляции. Чем большую частоту ШИМ имеют ПЧ-АВ, тем большее число гармоник подлежит удалению (для частоты 150 Гц – 2 гармоники, для 250 Гц – 4 и т.д.). Удалению подлежат обычно наиболее значимые гармоники (для 6-ти пульсной схемы это 5, 7, 11, 13 и др.).

Перечисленные алгоритмы ШИМ в совокупности со встроенными в ПЧ-АВ фильтрами позволяют получить приемлемый уровень гармоник напряжения на входе АВ вплоть до 40-й гармоники, однако исследования, проведенные, в том числе на стане холодной прокатки ППП ХП ЧерМК ПАО «Северсталь», показали, что такой подход к обеспечению качества напряжения неэффективен в случаях, когда конфигурация питающей сети приводит к возникновению резонансов тока, совпадающих с областью генерирования высших гармоник АВ.

Во второй главе представлены результаты экспериментальных исследований качества электроэнергии в системе внутривзаводского электроснабжения района ГПП-2 ЧерМК ПАО «Северсталь».

Исследования заключались в снятии и последующем анализе осциллограмм мгновенных значений линейных напряжений и токов в ячейках ГПП-2 с измерительными трансформаторами напряжения и тока, а также в ячейках РП-19 от которого запитаны главные электроприводы четырехклетьевого стан холодной прокатки с ПЧ-АВ фирмы ABB ACS6000. Точки подключения приборов обозначены на рис. 2.

Проведённые эксперименты показали, что основное влияние на качество электроэнергии в исследуемой системе электроснабжения оказывает работа главных электроприводов четырехклетьевого стана. При отключенных электроприводах стана значение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения K_U на секциях ГПП-2 не превышает 1,00 %, (рис. 3), при включенных электроприводах $K_U = 6,62$ %, (рис. 4 (в-е)). Самые серьёзные искажения напряжения наблюдались на секциях РП-19 (рис. 4 (а, б)).

Стандарт ГОСТ 32144-2013 устанавливает предельно допустимое значение $K_U = 8$ %, длительное 5%, учитывая гармоники вплоть до 40-й, однако, как показала практика, ПЧ-АВ генерирует значимые гармоники вплоть до 200-ой. Поэтому в дальнейшем анализ K_U проводился до 200-й гармоники.

При работе данного стана имели место аварийные отключения мощных источников бесперебойного питания (ИБП) и системы питания контроллеров серверов (ошибки по выпадению преобразователей ИБП из синхронизма). Помимо этого, было отмечено повышение потребления тока на 15-20% у систем освещения цехов. Также были зафиксированы случаи выхода из строя конденсаторов защитных РС цепей выпрямительных устройств, выходы из строя кабельных линий 10 кВ и устройств компенсации реактивной мощности на базе батарей статических конденсаторов 10 кВ без дополнительных реакторов.

Последующий анализ полученных данных заключался в построении частотной характеристики распределительной сети 10 кВ $Z(f)$ района ГПП-2 с помощью деления амплитудных значений высших гармонических составляющих напряжения на амплитудное значение соответствующих гармоник тока (1):

$$Z(i) = U_{m(i)} / I_{m(i)}, \quad (1)$$

где i – номер гармоники.

Поскольку в каждой ячейке ГПП-2 установлены реакторы для ограничения токов короткого замыкания, которые, взаимодействуя с ёмкостью кабельных линий отходящих фидеров, создают множественные резонансы, то совокупность их взаимодействия определяет сложную форму зависимости $Z(f)$ в точке общего подключения рис. 5. Наложение на частотную характеристику спектрального анализа напряжения ГПП-2 показывает, что

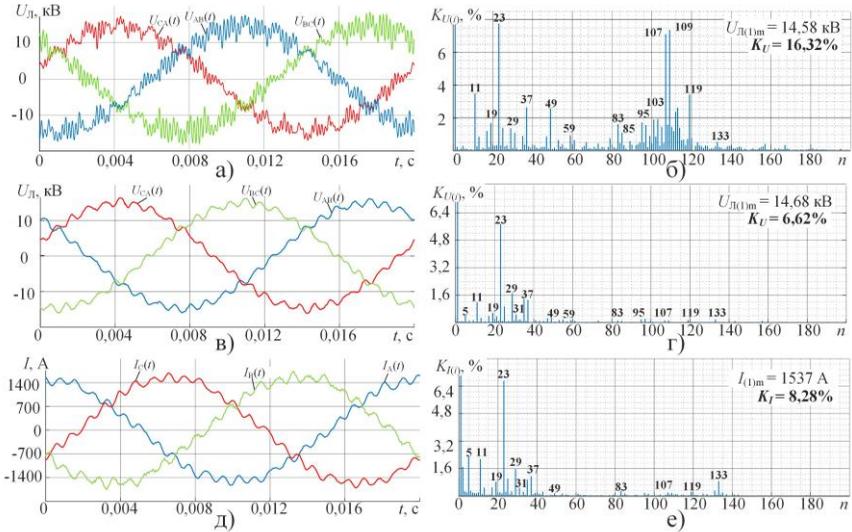


Рис. 4. Мгновенные значения (а, в, д) и спектральный анализ (б, г, е) напряжений и токов на секции 2 РУ-10 кВ ГПП2 (в, г, д, е) при совместной работе секций 1 и 2 с питанием от 2Т при работающих на холостом ходу электроприводах стана и напряжения на секции 1 РП-19 (а, б)

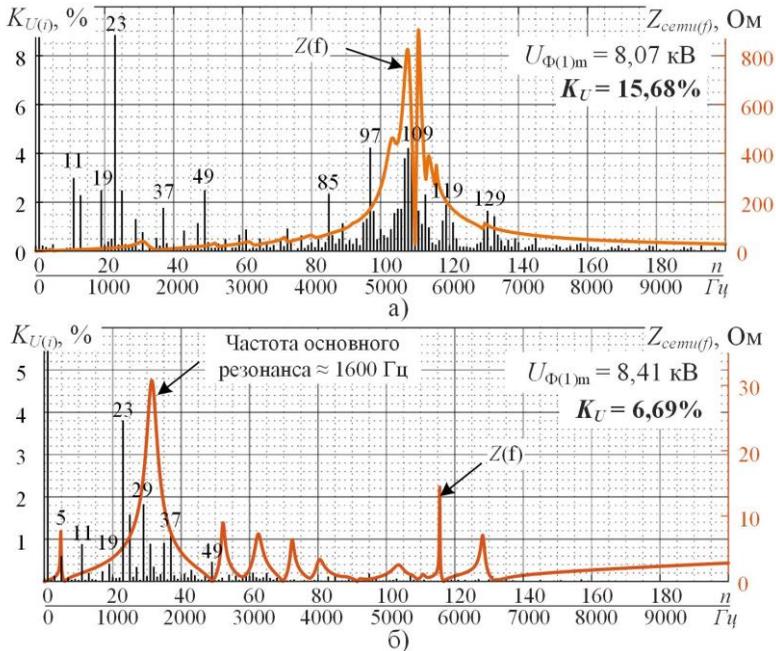


Рис. 5. Частотная характеристика и спектральный анализ напряжения на секциях РУ-10 кВ РП-19 (а) и секциях РУ-10 кВ ГПП-2 (б) при совместной работе секций от 2Т

Третья глава посвящена описанию разработанной имитационной модели электротехнического комплекса «Система внутривзаводского электроснабжения – электроприводы прокатного стана с ПЧ-АВ». Разработанная модель отличается от известных возможностью исследования качества электроэнергии при работе мощных ПЧ-АВ в сетях с резонансными явлениями при различных режимах электроснабжения и различных режимах работы ПЧ-АВ, а также при различных алгоритмах ШИМ АВ. Модель реализована с помощью математического пакета MATLAB Simulink и состоит из двух частей: модели системы электроснабжения ГПП-2 ЧерМК ПАО «Северсталь» (рис. 6) и модели главных электроприводов четырехклетьевого стана ППП ХП (рис. 7).

В модели системы электроснабжения были учтены: 1) параметры питающей сети 110 кВ на основании предоставленных значений токов трехфазного короткого замыкания в минимальном и максимальном режимах ($I_{к3.3\phi} = 12,7 - 23,6$ кА); 2) параметры сетевых трансформаторов 110/10 кВ 63 МВА; 3) параметры всех кабельных линий 10 кВ ГПП-2; 4) параметры электроприемников других цеховых РП и подстанций с упрощенным представлением в виде пассивных активно-индуктивных нагрузок с фиксированными параметрами, определенными на основании предоставленных суточных графиков изменения активной и реактивной мощностей, а также действующего значения тока.

Для адекватного анализа частотных характеристик при моделировании кабельных линий были использованы П-образные схемы замещения (одинарные П-секции) с учетом фактических значений активных сопротивлений, индуктивностей и емкостей кабелей, определенных на основании марки, сечения и длины кабеля, а также числа параллельных кабелей в одной фазе, указанными в кабельных журналах.

Для анализа влияния различных алгоритмов ШИМ на сеть 10 кВ были реализованы имитационные модели АВ электроприводов четырехклетьевого стана, состоящие из управляемых источников ЭДС, включенных последовательно с моделями понизительных трансформаторов Т1-Т5 10/3,165 кВ, учитывающих количество вторичных обмоток и их группу соединения, а также кабельных линий от РУ-10 кВ РП-19 до данных трансформаторов. Данные комплексы из вышеперечисленных элементов, полученные для каждого электропривода клетки №№1-4 и моталки, были интегрированы в разработанную ранее модель распределительной сети 10 кВ района ГПП-2.

Сигналы для управляемых источников ЭДС, моделирующих напряжение на входе АВ, формируются в упрощенной модели системы управления, включающей в себя пропорционально-интегральные регуляторы dq составляющих (РТ I_d и РТ I_q) входного тока АВ, датчики напряжения питающей сети (ДН), блок фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ или PLL), фильтр нижних частот (ФНЧ) для фильтрации сигналов обратных связей по ортогональным составляющим тока, блок преобразования координат abc/dq0, блок dq0/μθ для расчета коэффициента модуляции μ и угла θ, блок компенсации перекрестных связей БКПС, таблицу углов переключения, а также блок логики импульсов управления.

Необходимо отметить, что упрощенная реализация модели системы управления АВ без использования контура регулирования напряжения в звене постоянного тока АВ является допустимой при условии незначительного изменения напряжения в сети 10 кВ (не более ±5%), а также известных экспериментальных значениях токов на входе ПЧ-АВ для режимов холостого хода и работы под нагрузкой. В этом случае имитационная модель может быть реализована на базе управляемых источников ЭДС без реализации детальной модели трехуровневого АВ с тиристорными ключами. Благодаря этому стало возможным реализация комплексной модели сети 10 кВ района ГПП-2 и электроприводов четырехклетьевого стана с приемлемой скоростью расчета и адекватностью.

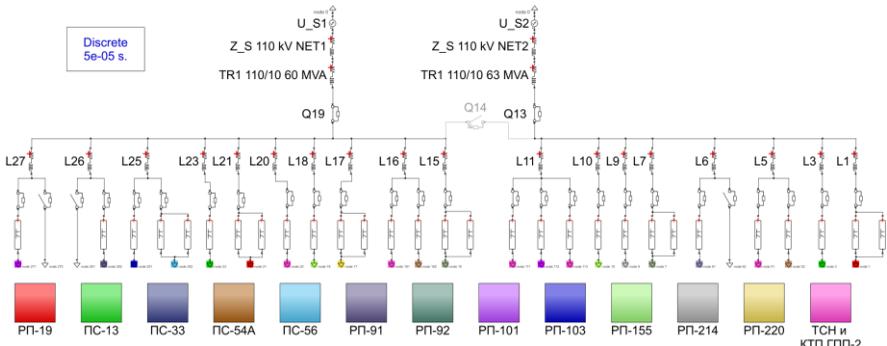


Рис. 6. Имитационная модель электрической сети 10 кВ района ГПП-2 ЧерМК ПАО «Северсталь», реализованная в математическом пакете Matlab Simulink

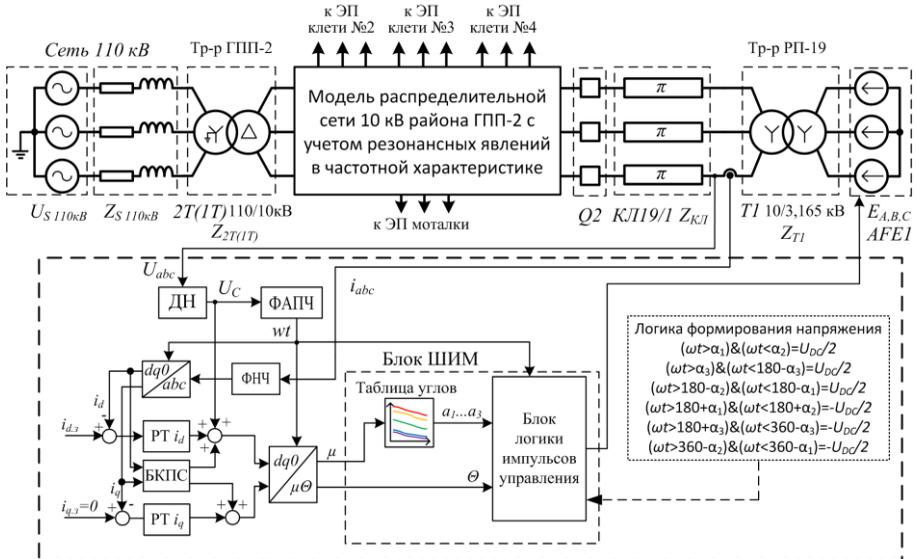


Рис. 7. Функциональная схема имитационной модели ПЧ-АВ ACS6000 электропривода клетки №1, интегрированная с моделью сети 10 кВ района ГПП-2

Для оценки адекватности разработанной модели было проведено сравнение результатов моделирования с экспериментальными осциллограммами, снятыми на действующем производстве ЧерМК ПАО «Северсталь». Данная проверка является корректной, поскольку работа ПЧ-АВ является стационарным процессом, мало зависящим от внешних факторов. Проведенное сравнение экспериментальных и расчётных K_u показало отклонение не более 5%. Пример сравнения для 1-й секции ГПП-2 при раздельной работе представлен на рис. 8.

В четвёртой главе, с помощью разработанной модели проведена разработка методики определения оптимальных параметров алгоритмов ШИМ АВ для адаптации к резонансным явлениям в питающей сети, а также предложен способ выявления резонансов в питающей сети с помощью тестового воздействия ПЧ-АВ.

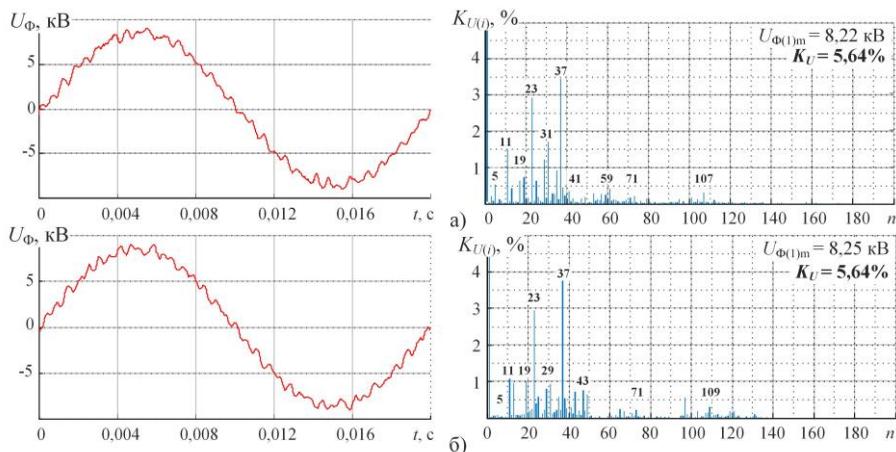


Рис. 8. Проверка адекватности разработанной модели: а – экспериментальные осциллограммы; б – осциллограммы, полученные на модели

Для определения областей резонансов в распределительных сетях среднего напряжения необходим анализ частотной характеристики сети $Z(f)$. Данную зависимость можно определить двумя способами: расчетным путем, опираясь на параметры сетевого трансформатора, кабельных линий и т.д., либо экспериментальным путем. Во втором случае среди потребителей в исследуемой сети должен присутствовать источник, генерирующий в сеть высшие гармоники тока. Под действием высших гармоник тока, с учетом нелинейного импеданса частотной характеристики, возникают высшие гармоники напряжения. Соотношение гармоник напряжения и тока позволяет определить частотную характеристику сети $Z(f)$. В данном случае в качестве такого активного элемента выступает ПЧ-АВ. С помощью АВ можно сделать тестовое воздействие на питающую сеть при отсутствии нагрузки на преобразователь (в режиме холостого хода). В результате воздействия несинусоидального тока АВ в напряжении сети должен появиться отклик соответствующего гармонического состава, благодаря чему возможно экспериментально восстановить частотную характеристику питающей сети.

Для повышения точности анализа частотной характеристики необходимо уменьшение безтоковых интервалов в ряде Фурье, что можно достичь за счет использования только одного 6-пульсного выпрямительного модуля. Однако такой источник высших гармоник содержит не полный спектр нечетных гармоник напряжения, описываемый по формуле $6 \cdot n (\pm 1)$, т.е. в нем отсутствуют гармоники кратные трем. Кроме того, некоторые гармоники либо отсутствуют (например, при SHE), либо их амплитуда очень мала (некоторые гармоники при FPPC), что затрудняет нахождение значений импеданса сети $Z(i)$ на данных частотах, рис.9а. По этой причине точность экспериментального определения частотной характеристики сети будет невысокой.

Для более точного определения $Z(f)$ необходимо, чтобы гармонический состав напряжения АВ был более широким. Этого можно добиться изменением алгоритма коммутации вентилях. Если обеспечить несимметрию фазных токов, не подавая на вентили одной из фаз импульсы управления, либо коммутируя вентили двух или одной фазы только на нулевую точку звена постоянного тока, можно получить в фазном токе высшие

гармоники, кратные трем. Одновременно оптимальным решением будет уменьшить частоту коммутации АВ до 50 Гц (одно переключение за четверть периода), для обеспечения наибольшего K_U , рис.9 б.

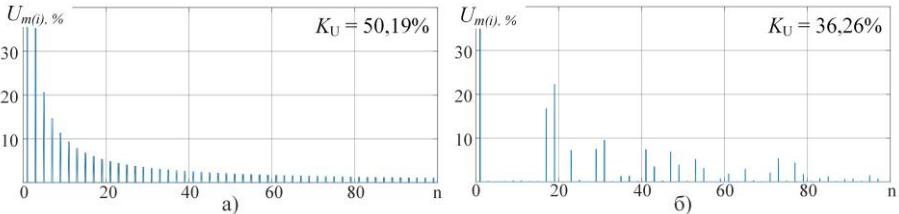


Рис. 9. Гармонический состав напряжения на входе АВ: а - при использовании SHE; б - при частоте коммутации 50 Гц и перекосе фаз

С помощью имитационной модели были смоделированы три резонансные области и проведено сравнение суммарных среднеквадратичных ошибок при их определении через отклик АВ с помощью стандартных алгоритмов ШИМ и при специальном тестовом воздействии таблица 1.

Таблица 1 - Оценка точности определения формы частотной характеристики сети при использовании тестовых воздействий со стороны ПЧ-АВ

Алгоритм ШИМ	Область резонанса			
	1000 Гц	2500 Гц	4000 Гц	Среднее значение
SHE и FRPC	17.41%	17.59%	18.79%	17.93%
Алгоритм ШИМ для тестовых воздействий	11.68%	11.06%	12.51%	11,75%

Как видно из таблицы 1 использование специального тестового воздействия АВ позволяет обеспечить приемлемую точность определения расположения резонанса в частотной характеристике питающей сети, что делает возможным корректное применение разработанной методики определения оптимальных параметров ШИМ АВ для адаптации к резонансным явлениям.

Обычно при определении углов коммутации вентилей АВ задаются условием минимизации или удаления из гармонического состава напряжения на входе АВ ближайших к основной высших гармонических составляющих. Так в АВ, выполненном по 6-ти пульсной схеме и настроенным на 5 переключений за четверть периода (250 Гц), удалению подлежат гармоники с $n = 5, 7, 11, 13$. При этом гармоники более высокого порядка, которые могут накладываться на резонансную область частотной характеристики питающей сети, усиливаются. Это может привести к следующей картине: K_U на входе АВ минимален, а K_U в питающей сети больше, чем если бы ШИМ удалялись гармоники более высокого порядка. Разработанная методика определения оптимальных параметров ШИМ АВ, учитывающая резонансные явления в частотной характеристике сети, предусматривает удаление или смягчение гармоник напряжения на входе АВ, попадающих в область основного резонанса в частотной характеристике питающей сети, с помощью изменения таблиц переключения вентилей АВ. Тем самым осуществляется адаптация параметров ШИМ АВ к конкретным условиям в питающей сети и значительно снижается влияние ПЧ-АВ на питающую сеть.

Для оценки эффективности предложенной методики было проведено сравнение результатов моделирования на классической для АВ ШИМ SHE с удалением 5, 7, 11, 13 гармоник, углы переключения для которого рассчитываются по известным уравнениям,

и ШИМ с измененными параметрами, где удалению подлежат наиболее близкие к резонансу гармоники с $n = 17, 19, 23, 25$, в сети с резонансом токов на частоте 1000 Гц (20-я гармоника). Также на основе алгоритма ШИМ Selective Harmonic Mitigation (SHM), который ослабляет условие обнуления гармоник до заданного максимального значения конкретной гармоники, была рассчитана таблица углов переключения вентиля, ослабляющая гармоники в диапазоне 13-29. Результаты моделирования представлены на рис.10, в левой части - гармонический состав напряжения питающей сети, справа - гармонический состав напряжения на входе АВ.

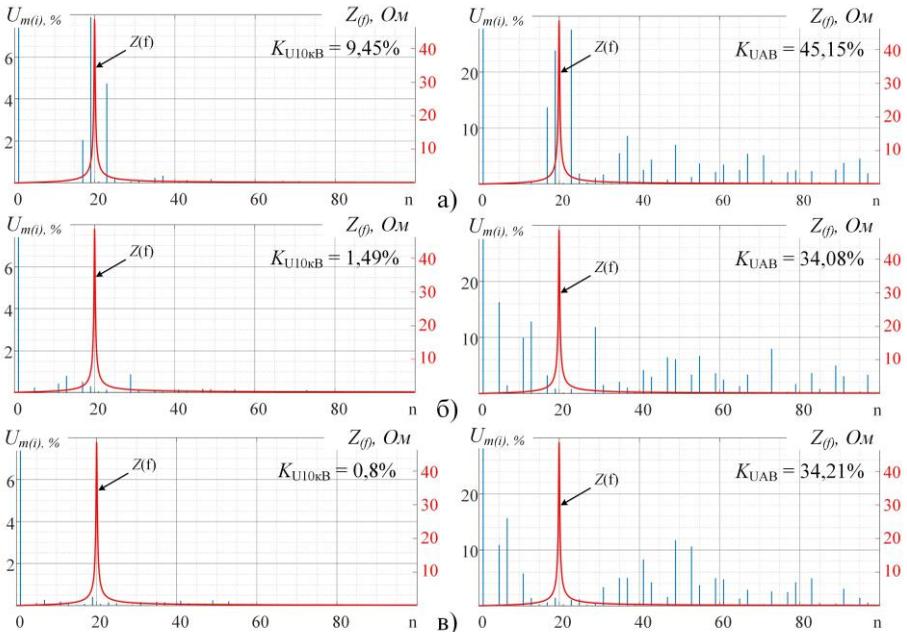


Рис. 10. Результат моделирования а) SHE (5, 7, 11, 13), б) SHE (17, 19, 23, 25), в) SHM смягчение (13 - 29)

Из полученных результатов видно, что применение ШИМ с измененными параметрами на основе SHM снижает $K_{U10кВ}$, в сравнении с классическим SHE в 11,8 раз, а SHE (17, 19, 23, 25) в 6,3 раз. Иными словами, применение ШИМ, определенных по разработанной методике, в распределительных сетях среднего напряжения с наличием резонансных явлений позволяет существенно улучшить гармонический состав напряжения сети и обеспечить электромагнитную совместимость ПЧ-АВ среднего напряжения с питающей сетью.

В пятой главе проведена оценка эффективности предложенных алгоритмов ШИМ на действующем оборудовании электроприводов стана холодной прокатки ППП ХП ЧерМК ПАО «Северсталь».

Как было указано ранее, существующие таблицы углов переключения ШИМ, используемые в АВ электроприводах клеток №№1-4 и натяжной моталки, не являются оптимальными с точки зрения влияния на питающую сеть 10 кВ. В частности, было установлено:

1. В контроллере ШИМ АВ электропривода клетки №1 реализован алгоритм ШИМ с удалением выделенных гармоник с номерами 5 и 7 с 3 переключениями за четверть периода; в результате в гармоническом спектре потребляемого тока присутствуют гармоники значимой амплитуды с $n = 11, 13, 19, 23, 29$, которые попадают в основную резонансную область в частотной характеристике распределительной сети 10 кВ относительно секций РУ-10 кВ ГПП-2 и усиливаются в фазных и линейных напряжениях сети.

2. Для ПЧ-АВ электроприводов клеток №2 и №4 применен алгоритм ШИМ с удалением выделенных гармоник с $n = 5, 7, 11, 13, 17, 19$ с 7 переключениями за четверть периода. Принимая во внимание, что данный ПЧ-АВ имеет 12-ти пульсную схему питания, использование алгоритма ШИМ с удаляемыми гармониками с $n = 5, 7, 17, 19$ в токе на входе преобразователя не является рациональным, поскольку в данном случае не используется эффект удаления указанных гармоник за счет 12-ти пульсной схемы питания. Также в токах, потребляемых ПЧ-АВ из сети 10 кВ, присутствуют значимые гармоники с $n = 23, 25, 35, 37$ и другие, которые попадают в основную резонансную область частотной характеристики сети 10 кВ относительно секций РУ-10 кВ ГПП-2, с последующим усилением в напряжении сети.

3. В потребляемом токе электроприводов клетки №3 присутствуют гармоники с $n = 11, 13, 23, 25, 35, 37$ и т.д., не характерные для 12-ти пульсной схемы выпрямления. С учетом того, что для данного АВ применяется ШИМ с 7 переключениями за четверть периода, используемые настройки ШИМ не являются оптимальными.

4. Для АВ электроприводов натяжной моталки применяется ШИМ с удалением выделенных гармоник с 9 переключениями. В потребляемом токе присутствуют гармоники с $n = 23, 29$ и др., попадающие в основную резонансную область частотной характеристики сети, относительно секций РУ-10 кВ ГПП-2. Учитывая, что при 9 переключениях существует возможность полного удаления 8-ми значимых гармоник с номерами $n = 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25$, текущие настройки ШИМ не являются оптимальными.

С учетом выявленных резонансных явлений в частотной характеристике сети относительно секций РУ-10 кВ ГПП-2, являющихся точками общего присоединения мощных электроприводов четырехклетьевого стана, а также чувствительных к качеству электроэнергии электроприемников, было предложено использование измененных настроек ШИМ активных выпрямителей преобразователей частоты ACS6000. Основным критерием оптимизации настроек ШИМ в данном случае являлось отсутствие значимых гармоник низкого и среднего частотного диапазона в потребляемых токах ПЧ-АВ с целью исключения попадания в основную резонансную область частотной характеристики сети 10 кВ. Теоретические исследования показали, что это возможно при использовании следующих настроек ШИМ АВ:

1) для АВ электроприводов клетки №1 и моталки, имеющих 6-ти пульсную схему питания, используется ШИМ с удалением выделенных гармоник с 9-ю переключениями за четверть периода, при этом в токах должны быть удалены первые 8 значимых гармоник с номерами $n = 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25$;

2) для АВ электроприводов клеток №№ 2, 3, 4, имеющих 12-ти пульсную схему питания, используется ШИМ с 7-ю переключениями за четверть периода, при этом в токах, потребляемых из сети ПЧ-АВ, должны быть удалены гармоники с $n = 11, 13, 23, 25, 35, 37$.

Реализация данных изменений, как будет показано далее, позволила существенно уменьшить величину суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения на секциях РУ-10 кВ ГПП-2 за счет исключения попадания значимых гармоник тока ПЧ-АВ ACS 6000 в основную резонансную область в частотной характеристике сети 10 кВ. Настройка ШИМ проводилась в 2020 году специалистами компании АВВ с использованием модифицированных таблиц углов переключения вентилях АВ. Получение новых таблиц углов переключения вентилях АВ проводилось по методике, описанной в главе 4.

Для оценки эффективности использования усовершенствованных алгоритмов ШИМ был выполнен сравнительный анализ гармонического состава напряжения на секциях РУ-10 кВ ГПП-2 и на секциях РП-19. Результаты анализа приведены на рис. 11. Из рисунка видно, что применение новых настроек ШИМ обеспечивает снижение K_U на 82,3% при совместной работе секций ГПП-2 от одного трансформатора. При раздельной работе секций также достигается существенное снижение K_U в зависимости от режима работы от 19,7-59,8%. На секциях РП-19 форма напряжения улучшается, в среднем на 23,9-51,4%.

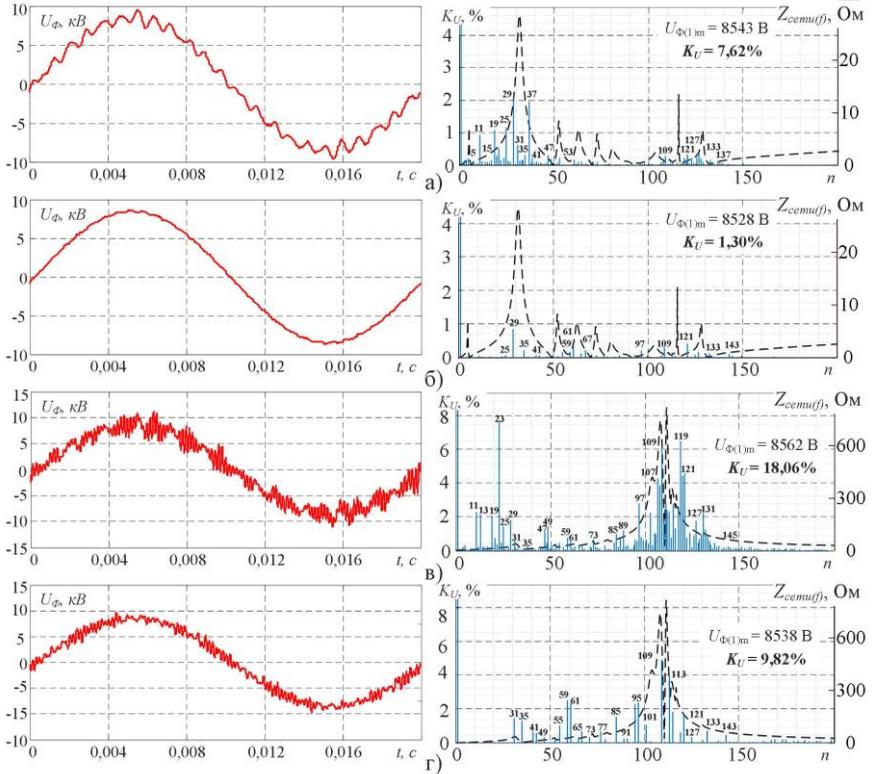


Рис.11. Осциллограммы фазного напряжения РУ-10 кВ ГПП-2 (а, б) и РП-19 (в, г) при совместной работе секций 1 и 2 ГПП-2, полученные до (а, в) и после (б, г) внедрения усовершенствованных алгоритмов ШИМ в ПЧ-АВ четырехклетьевого стана

Ниже представлена таблица 2, в которой проведен сравнительный анализ максимальных значений несинусоидальности кривой напряжения за 2020 год, до внедрения измененных таблиц углов переключения ШИМ в ПЧ-АВ стана, и за 2021 год, когда ПЧ-АВ работали с новыми таблицами углов переключения. Также проведено сравнение количества гармоник, не соответствующих ГОСТ 32144-2013 до и после внедрения усовершенствованных ШИМ. Благодаря улучшению качества напряжения на секциях РУ-10 кВ ГПП-2 снизилось число простоев и отказов оборудования, чувствительного к качеству электроэнергии, а именно: источники бесперебойного питания, питающие контроллеры и серверное оборудование агрегатов непрерывного горячего цинкования, а также устройства компенсации реактивной мощности

среднего напряжения на базе конденсаторных батарей без реакторов, получающие питание от общих шин ГПП-2 ЧерМК ПАО «Северсталь».

Таблица 2 – Результаты сравнения измененных значений показателей качества электрической энергии до и после внедрения новых таблиц переключения

Показатель:	Режим работы:	До внедрения	После внедрения	Относительное изменение:
Наибольший коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения K_U , %	ПЧ-АВ под нагрузкой	13,98	3,7	-71,6 %
	ПЧ-АВ на холостом ходу	12,41	4,56	-63,3 %
Количество гармоник не соответствующих ГОСТ 32144-2013, шт.	ПЧ-АВ под нагрузкой	14	9	-35,7 %
	ПЧ-АВ на холостом ходу	12	7	-41,7 %

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИИ

1. Получены новые результаты экспериментальных исследований качества напряжения в системах электроснабжения с резонансными явлениями, в составе которых имеются электроприводы с ПЧ-АВ большой мощности, показывающие влияние резонансов на искажение напряжения в точке общего подключения электроприемников при совпадении области резонанса в сети с областью высших гармоник, потребляемых ПЧ-АВ.

2. Разработана имитационная модель «Система внутривзаводского электроснабжения – электроприводы прокатного стана с ПЧ-АВ», позволяющая исследовать влияние электроприводов с ПЧ-АВ на качество напряжения питающей сети при наличии в ней резонансных явлений. Модель позволяет задавать разные параметры алгоритмов ШИМ АВ и исследовать их влияние на качество напряжения при различных формах частотной характеристики питающей сети.

3. Предложен новый способ выявления резонансов в частотной характеристике питающей сети, основанный на использовании специальных тестовых воздействий со стороны ПЧ-АВ на питающую сеть. Применение данного способа дает возможность с достаточной точностью определять резонансные области в частотной характеристике питающей сети, что позволяет рассчитать оптимальную таблицу переключения вентилях АВ для уменьшения его влияния на качество питающего напряжения.

4. Разработана усовершенствованная методика определения оптимальных параметров ШИМ АВ, учитывающая резонансные явления в частотной характеристике сети. Применение параметров ШИМ АВ, определенных по разработанной методике, позволяет существенно улучшить гармонический состав напряжения питающей сети в точке общего подключения электроприемников и снизить суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения до приемлемого уровня.

5. Проведено исследование эффективности разработанной методики на действующем оборудовании стана холодной прокатки ППП ХП ЧерМК ПАО «Северсталь». Применение новых таблиц переключения вентилях АВ позволило улучшить гармонический состав напряжения на секциях ГПП и снизить среднее значение K_U почти в 2 раза, а наибольшее значение зафиксированного K_U в 2,7-3,5 раза, в зависимости от режима работы. Благодаря улучшению качества напряжения стало возможна параллельная работа прокатного стана и чувствительных электроприемников, получающих питание от общих секций ГПП.

