

На правах рукописи



ДЕНИСЕВИЧ АЛЕКСАНДР СЕРГЕЕВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ
ПРОКАТНОГО СТАНА ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЕ С ДУГОВОЙ
СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧЬЮ**

Специальность 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Магнитогорск – 2024

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

Научный руководитель: **Николаев Александр Аркадьевич**
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Мещеряков Виктор Николаевич**,
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», заведующий кафедрой электропривода и робототехники (г.Липецк)

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

Ведущая организация: ФГАО ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», (г. Челябинск)

Защита состоится 20 декабря 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 « ____ » _____ 2024 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 характеризуется непрерывным совершенствованием его элементной базы, а также развитием преобразовательной техники. Современные главные электроприводы прокатных станов выполняются на базе высоковольтных синхронных электродвигателей и высоковольтных преобразователей частоты с активными выпрямителями (АВ) и автономными инверторами напряжения (АИН).

Применение преобразователей частоты с активными выпрямителями (ПЧ-АВ) обусловлено рядом преимуществ по сравнению с неуправляемыми выпрямителями, среди которых можно выделить: 1) потребление практически только активной мощности из питающей сети; 2) возможность двунаправленного обмена электрической энергией при работе АВ в выпрямительном и инверторном режимах работы; 3) поддержание коэффициента искажения синусоидальности на приемлемом уровне в точке подключения преобразователя частоты.

Управление транзисторами/тиристорами АВ осуществляется системой управления по методу ШИМ. Опыт эксплуатации ПЧ-АВ показал, что системы управления АВ чувствительны к отклонениям напряжения питающей сети. Несимметрия напряжения более 10% вызывает увеличение токов, потребляемых АВ и увеличение колебаний напряжения в звене постоянного тока, амплитуда которых превышает 5% номинального уровня. В связи с этим происходят аварийные остановки электрооборудования. Устойчивая работа механизмов на базе ПЧ-АВ зависит от качества напряжения в точке подключения, которое нормируется ГОСТ 32144-2013 (EN50160:2010). Так, например, возникновение однофазного провала напряжения на уровне 30% приводит к возникновению колебаний напряжения в звене постоянного тока, амплитуда которых достигает 20% номинального значения. Несимметрия напряжения питающей сети приводит к увеличению токов, потребляемых АВ, в 1,5-2 раза от номинального значения, а также вызывает их несимметрию. Из сказанного выше следует, что несимметричные провалы напряжения приводят к аварийному отключению ПЧ-АВ внутренними защитами преобразователя. Аварийные отключения ПЧ-АВ характеризуются нарушением нормального технологического процесса и приводят к значительному материальному ущербу для промышленного предприятия.

Рассматриваемая проблема наблюдается на металлургическом заводе ММК Metalurji, г Дёртиол, Турция на стане горячей прокатки (СП) 1750. Электроснабжение завода осуществляется по воздушной линии электропередач 380 кВ, которая проходит через горную местность с лесными массивами. В связи с этим часто возникают однофазные короткие замыкания, сопровождающиеся провалами напряжения. Провалы напряжения трансформируются во внутривзаводскую сеть 34,5 кВ через сетевые трансформаторы и оказывают негативное влияние на работу ПЧ-АВ. Частота возникновения провалов напряжения, сопровождающихся отключением главных электроприводов СП 1750, составляет до 50 раз в год. В связи с этим было предложено объединить на параллельную работу секции шин 34,5 кВ, питающих электросталеплавильный комплекс, и главные электроприводы СП 1750. Компенсация провалов напряжения обеспечивается с помощью резервов реактивной мощности статического тиристорного компенсатора (СТК), функционирующего в составе электросталеплавильного комплекса.

Дуговая сталеплавильная печь (ДСП) является электроприемником с резкопеременным и нелинейным характером нагрузки. В связи с этим при работе печи возникают возмущения напряжения в точке подключения ДСП, характеризующиеся высоким коэффициентом несимметрии по обратной последовательности. При эксплуатации электросталеплавильного комплекса наблюдается ряд технологических особенностей, на-

пример, таких как: 1) включение печного трансформатора (ПТ) на холостом ходу; 2) включение фильтрокомпенсирующих цепей (ФКЦ), входящих в состав СТК. Включение ПТ на холостом ходу сопровождается броском тока намагничивания с амплитудами до 2-3 номинальных токов ПТ, что вызывает дополнительные провалы напряжения на общих секциях главной понижительной подстанции (ГПП). При включении ФКЦ, возникают коммутационные перенапряжения на секциях ГПП, достигающие 30% от номинального уровня напряжения сети. Данные возмущающие воздействия, помимо внешних провалов напряжения, оказывают дополнительное негативное влияние на устойчивость работы электроприводов прокатного стана на базе ПЧ-АВ.

Таким образом, решение проблемы повышения эффективности функционирования электроприводов прокатного стана при параллельной работе с дуговой сталеплавильной печью является актуальным, как для действующих компактных металлургических предприятий России (ПАО ММК, ПАО Северсталь, АО Сортовой завод Балаково и др.), так и для зарубежных предприятий (ЗАО «ММК Metalurji» и др.). Решение вопросов устойчивой параллельной работы электросталеплавильного и прокатного комплексов позволит значительно сократить риски возникновения аварийных режимов работы внутривозводских сетей и тем самым сократить вероятность возникновения связанных с ними экономических потерь.

Степень разработанности. Исследования режимов работы ПЧ-АВ при несимметрии напряжения питающей сети, а также влияния работы АВ на питающую сеть отражены в трудах отечественных и зарубежных ученых: А.А. Николаева, Г.П. Корнилова, Цзин Тао, Сычева Ю.А., Брованова С.В., Буланова М.В., Гилемова И.Г., Афанасьева М.Ю., Ивекеева В.С., А.С. Маклакова, М.А. Р.Т. Шрейнера, J. Rodriguez, H. Abu-Rub, I.L. Jose, B. W., D.G. Holmes, J. Holtz, B. Wu, Dehong Xu, Yangfan Zhang и других.

Большинство работ, направленных на исследование режимов работы ПЧ-АВ при несимметрии питающего напряжения, посвящено совершенствованию системы управления АВ за счет введения предмодулирующих сигналов по напряжению обратной последовательности, третьей гармоники, напряжению сети, ориентированной по вектору напряжения обратной последовательности. А также использованию динамического компенсатора искажения напряжения (на примере СТАТКОМ). Результаты экспериментальных исследований параллельной работы электроприводов на базе ПЧ-АВ и электроприемников с резкопеременным характером нагрузки изучены крайне слабо. Это связано с трудностями проведения экспериментов на действующем оборудовании. Необходимо отметить, что внедрение предлагаемых авторами модернизированных систем управления АВ с адаптацией к несимметрии напряжения сети затруднительно из-за закрытой структуры программного кода системы управления преобразователями частоты. Установка динамических компенсаторов напряжения сопровождается значительными экономическими вложениями. В связи с этим вопрос возможности параллельной работы электросталеплавильного комплекса и электроприводов на базе ПЧ-АВ заслуживает детального рассмотрения в рамках отдельной исследовательской работы.

Объектом исследования является электротехнический комплекс «система электропитания промышленного предприятия – мощные электроприводы клетей стана горячей прокатки «1750» на базе шести ПЧ-АВ суммарной мощностью 50,5 МВт – сверхмощная дуговая сталеплавильная печь ДСП-250 (300 МВА) со статическим тиристорным компенсатором реактивной мощности СТК 330 МВар.

Предметом исследования является система управления активных выпрямителей в составе ПЧ-АВ мощных электроприводов клетей прокатного стана.

Целью диссертационной работы является повышение устойчивости электроприводов прокатного стана на базе ПЧ-АВ при параллельной работе с дуговой сталеплавильной печью в условиях наличия колебаний и провалов напряжения, создаваемых

работой ДСП и внешними возмущающими воздействиями со стороны электроэнергетической системы.

Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

1. Экспериментальный и теоретический анализ влияния несимметрии напряжения питающей сети на работу ПЧ-АВ в составе электроприводов клетей стана горячей прокатки «1750» ЗАО «ММК Metalurji» (г. Дёртйол, Турция) при внешних провалах напряжения и параллельной работе с ДСП.

2. Разработка усовершенствованной имитационной модели электротехнического комплекса «ДСП-СТК-ПЧ-АВ» для проведения исследований влияния несимметрии напряжения питающей сети на работу ПЧ-АВ при параллельной работе с ДСП.

3. Проведение теоретических исследований возможности параллельной работы электроприводов на базе ПЧ-АВ и ДСП. Проведение оценки устойчивости работы ПЧ-АВ при включении печного трансформатора на холостом ходу, а также при включении ФКЦ, в составе СТК.

4. Разработка усовершенствованной системы управления АВ в составе ПЧ-АВ, обеспечивающей необходимую устойчивость при возмущениях, вызванных работой электросталеплавильного комплекса, с дополнительным контуром регулирования тока по реактивной составляющей, а также с отдельным регулированием ортогональных составляющих токов по прямой и обратной последовательностям.

5. Оценка эффективности разработанной системы управления АВ для повышения устойчивости работы ПЧ-АВ при включении печного трансформатора, а также при включении ФКЦ. Оценка результирующего эффекта повышения устойчивости работы ПЧ-АВ при совместном использовании СТК и разработанной системы управления АВ.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработана усовершенствованная имитационная модель электротехнического комплекса «ДСП-СТК-ПЧ-АВ», отличающаяся от известных тем, что позволяет проводить теоретические исследования влияния несимметрии напряжения питающей сети на работу ПЧ-АВ, исследования возможности параллельной работы ДСП и группы электроприводов СГП «1750» на базе ПЧ-АВ, проводить исследования влияния коммутационных процессов при включении ПТ на холостом ходу, при включении ФКЦ СТК.

2. Получены результаты теоретических исследований, доказывающие возможность параллельной работы главных электроприводов клетей СГП на базе ПЧ-АВ с электросталеплавильным комплексом.

3. Разработана усовершенствованная система управления АВ в составе ПЧ-АВ, отличающаяся от известных тем, что для повышения устойчивости работы ПЧ-АВ при возмущениях напряжения питающей сети реализован внешний контур регулирования сетевого тока по реактивной составляющей и дополнительный контур регулирования ортогональных составляющих тока обратной последовательности.

4. Получены результаты исследований эффективности усовершенствованной системы управления АВ, доказывающие наличие технического эффекта по повышению устойчивости ПЧ-АВ при внешних провалах напряжения питающей сети, параллельной работе с ДСП, коммутационных перенапряжениях и отклонениях напряжения, вызванных включением ФКЦ СТК и печного трансформатора на холостом ходу.

Практическая ценность и реализация работы заключается в том, что разработанная система управления АВ со стабилизирующим эффектом при возмущениях напряжения питающей сети позволяет повысить устойчивость ПЧ-АВ при параллельной работе с мощной ДСП. Совместное использование СТК и ПЧ-АВ с усовершенствованной системой управления позволяет сохранить устойчивую работу электроприводов прокатного стана при провалах напряжения в сети глубиной до 50%. На примере металлургического завода ЗАО «ММК Metalurji» (г. Дёртйол, Турция) доказано что, технический эффект от внедрения разработанной системы управления АВ и совместного использования вместе с СТК заключает-

ся в уменьшении количества простоев СГП «1750», вызванных провалами напряжения сети. Вероятность сохранения устойчивой работы главных электроприводов СГП «1750» при использовании усовершенствованной системы управления АВ при возникновении провалов напряжения во внешней питающей сети 380 кВ, составляет 90%.

Разработанная усовершенствованная система управления АВ рекомендуется к внедрению на аналогичных металлургических предприятиях, включающих мощные ДСП с СТК, электроприводы прокатных станов на базе ПЧ-АВ, получающих питание от общих секций среднего напряжения главной понизительной подстанции.

Методика проведения исследований. В работе использованы основные положения и методы теории автоматического управления, теоретических основ электротехники, электрических машин, силовой электроники, а также методы математического моделирования в среде Matlab (Simulink). Экспериментальные данные для исследований получены на действующем металлургическом заводе ЗАО «ММК Metalurji» (г. Дёртиол, Турция), имеющем в своем составе ДСП-250 (300 МВА) и стан горячей прокатки 1750 с электроприводами суммарной мощностью 50,4 МВт.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

1. Усовершенствованная имитационная модель электротехнического комплекса «ДСП-СТК-ПЧ-АВ», для проведения теоретических исследований влияния несимметрии напряжения питающей сети на работу ПЧ-АВ, возможности параллельной работы ДСП и группы электроприводов СГП «1750» на базе ПЧ-АВ, влияния коммутационных процессов, возникающих при включении ПТ на холостом ходу, а также при включении ФКЦ СТК.

2. Результаты теоретических исследований, доказывающие возможность параллельной работы главных электроприводов клетей СГП на базе ПЧ-АВ и электросталеплавильного комплекса на базе сверхмощной ДСП-250 со статическим тиристорным компенсатором.

3. Усовершенствованная система управления АВ в составе ПЧ-АВ с внешним контуром регулирования тока по реактивной составляющей и контуром регулирования ортогональных составляющих токов обратной последовательности, обеспечивающая устойчивость при сильных отклонениях напряжения питающей сети.

4. Результаты исследований эффективности усовершенствованной системы управления АВ по повышению устойчивости работы ПЧ-АВ при внешних провалах напряжения, параллельной работе с ДСП, коммутационных перенапряжениях и отклонениях напряжения, вызванных включением ФКЦ СТК и печного трансформатора на холостом ходу.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются 1) правомочностью исходных положений и предпосылок; 2) корректным использованием математических и имитационных методов моделирования на ЭВМ; 3) соответствием полученных в работе результатов представленным в научных трудах по схожей тематике других авторов; 4) результатами экспериментальных исследований, полученных на действующем производстве – в электротехническом комплексе ЗАО «ММК Metalurji» на главных электроприводах стана горячей прокатки «1750» и электросталеплавильном комплексе.

Соответствие паспорту научной специальности. Проблематика, рассмотренная в диссертации, соответствует пунктам 1,3,4 паспорта научной специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы (п.1. Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, анализ системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем, включая электромеханические, электромагнитные преобразователи энергии и электрические аппараты, системы электропривода, электроснабжения и электрооборудования; п.3. Разработка, структурный и параметрический синтез, оптимизация электротехнических комплексов, систем и их компонентов, разработка алгоритмов эффективного управления; п.4. Исследование работоспособности и качества

функционирования электротехнических комплексов, систем и их компонентов в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях, диагностика электротехнических комплексов).

Апробация результатов диссертационной работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на 6 международных конференциях, в том числе: Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI) (г. Магнитогорск, оз. Банное, 2021); Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI) (г. Магнитогорск, оз. Банное, 2020); Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI) (г. Магнитогорск, оз. Банное, 2019); 73-ей Международной научно-технической конференций «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» (г.Магнитогорск, 2015); 75-ой Международной научно-технической конференций «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» (г.Магнитогорск, 2017); 77-ой Международной научно-технической конференций «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» (г. Магнитогорск, 2019).

В 2023-2024 гг. исследования выполнялись в рамках государственного задания (научный проект №FZRU-2023-0008) по теме «Разработка фундаментальных основ и научно обоснованных технических решений для повышения ресурсо- и энергоэффективности электротехнических и технологических систем предприятий горно-металлургического комплекса России».

Публикации. По содержанию диссертации опубликовано **9** научных трудов, в том числе **3** статьи в изданиях, входящих в перечень рекомендованных ВАК РФ, **3** статьи в изданиях, индексируемых Scopus, получен **1** патент на изобретение и **2** свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем работы. Структура диссертации включает в себя введение, пять глав, заключение и список литературы из **111** наименований. Работа изложена на **168** страницах основного текста, содержит **55** рисунков, **15** таблиц и приложения объемом **12** страниц.

Личный вклад автора. Все результаты диссертационной работы получены автором самостоятельно. Автором разработана усовершенствованная имитационная модель электротехнического комплекса «ДСП-СТК-ПЧ-АВ», позволяющая проводить исследования влияния отклонений напряжения, вызванных работой ДСП и внешних возмущающих воздействий со стороны электроэнергетической системы. Проведены исследования, доказывающие возможность параллельной работы главных электроприводов клетей СГП на базе ПЧ-АВ и электросталеплавильного комплекса на базе сверхмощной ДСП-250 со статическим тиристорным компенсатором. Разработана усовершенствованная система управления АВ в составе ПЧ-АВ с внешним контуром регулирования тока по реактивной составляющей и контуром регулирования ортогональных составляющих токов обратной последовательности, обеспечивающая устойчивость при сильных отклонениях напряжения питающей сети и при параллельной работе с ДСП. Проведена оценка эффективности разработанной усовершенствованной системы управления АВ.

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 литературный анализ существующих способов обеспечения устойчивой работы преобразователей частоты с активными выпрямителями при провалах напряжения. На сегодняшний день широкое распространение получили схемы главных электроприводов прокатных станов на базе высоковольтных синхронных (асинхронных) электродвигателей и преобразователей частоты с активными выпрямителями (АВ) и авто-

номными инверторами напряжения (АИН) (рис.1). Силовые схемы АВ и АИН выполнены на базе полностью управляемых полупроводниковых ключей (IGBT- транзисторах и IGBT-тиристорах). Управление ключами АВ и АИН происходит методом широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Активный выпрямитель подключен к сети переменного тока и преобразует переменное напряжение в стабильное выпрямленное напряжение в звене постоянного тока, АИН подключен к звену постоянного тока для преобразования выпрямленного напряжения в переменное с регулируемой частотой.

Опыт эксплуатации ПЧ-АВ на промышленных предприятиях показывает, что системы управления АВ не адаптированы к несимметрии питающего напряжения. Возникающие в питающей сети несимметричные провалы напряжения приводят к отключению преобразователей частоты защиты АВ, что влечет за собой значительный экономический ущерб из-за недовыпуска готовой продукции.

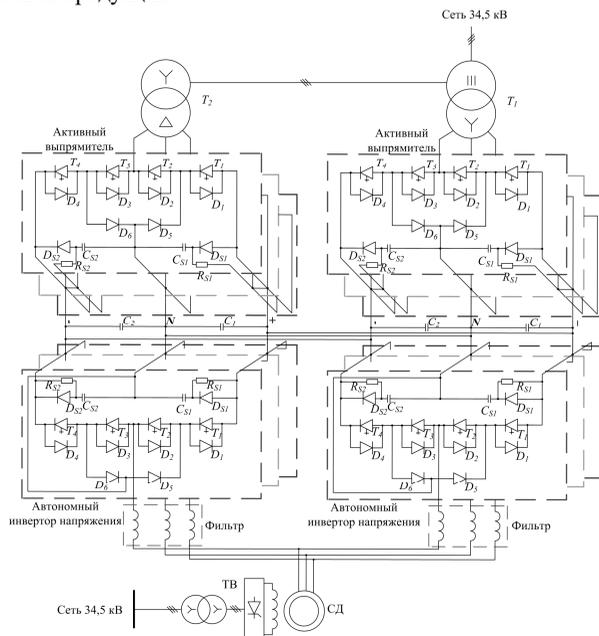


Рис.1. Упрощенная силовая схема главного электропривода СГП «1750»

Проведен обзор отечественной и зарубежной литературы, посвященной вопросу обеспечения устойчивой работы преобразователей частоты с АВ при несимметричных провалах напряжения. Литературный обзор показал, что на сегодняшний день предложено несколько способов повышения устойчивости работы ПЧ-АВ. Большинство способов основаны на введении в систему управления АВ предмодулирующих сигналов по напряжению обратной последовательности, напряжению третьей гармоники, сетевому напряжению, ориентированному по вектору напряжения обратной последовательности, а также на переводе АВ в диодный режим. Введение предмодулирующих сигналов по напряжению при глубине провалов сетевого напряжения более 15% не обеспечивает полной компенсации токов обратной последовательности. В связи с этим в звене постоянного тока возникают колебания напряжения, амплитуда которых превышает 10%. Перевод АВ в диодный режим работы также не обеспечивает устойчивой работы ПЧ-АВ при провалах напряжения более 20%. При переводе в диодный режим напряжение в звене постоянного тока не контролируется и снижается более чем на 10%. В связи с этим при восстановлении напряжения сети и подаче

импульсов управления на ключи АВ происходит бросок тока, действующее значение которого превышает уставку срабатывания защиты АВ.

Для повышения устойчивости ПЧ-АВ в составе электроприводов клетей прокатных станов при провалах напряжения глубиной более 20% ранее было предложено использовать резервы реактивной мощности СТК, функционирующих в составе электросталеплавильных комплексов со сверхмощными ДСП. Для реализации этого способа необходимо объединить на параллельную работу электроприводы клетей на базе ПЧ-АВ и электросталеплавильный комплекс. Однако для оценки возможности параллельной работы ПЧ-АВ и мощной ДСП необходимо проведение дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

Вторая глава посвящена экспериментальным исследованиям работы ПЧ-АВ в составе электроприводов клетей стана горячей прокатки 1750 ЗАО «ММК Metalurji» (г. Дёртйол, Турция) при однофазных провалах напряжения, а также исследованию режимов работы дуговой сталеплавильной печи ДСП-250 (300 МВА) с СТК 330 МВАр.

Исследования заключались в настройке программного обеспечения Drive Window на запись переходных процессов токов, потребляемых АВ, и напряжения в звене постоянного тока при возникновении провалов напряжения в питающей сети. А также записи мгновенных значений токов и напряжений при работе ДСП-250. За время проведения экспериментальных исследований были записаны переходные процессы токов, потребляемых АВ, и напряжения в звене постоянного тока при возникновении провала напряжения глубиной 13% в сети 380 кВ (рис.2).

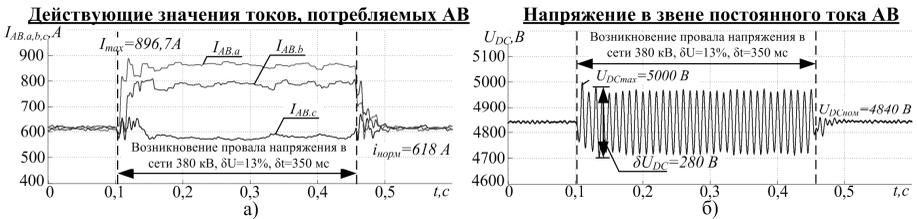


Рис.2. Переходные процессы при возникновении провала напряжения в сети 380 кВ глубиной 13%: а- токов, потребляемых АВ; б- напряжения в звене постоянного тока

Из анализа переходных процессов видно, что возникновение в сети 380 кВ однофазного провала напряжения глубиной 13% вызывает увеличение и несимметрию токов, потребляемых АВ (рис.2, а). В токах появляется составляющая обратной последовательности, которая приводит к колебаниям напряжения в звене постоянного тока, с частотой 0,01 с (рис.2, б). При незначительной глубине провала напряжения, размах колебаний напряжения в звене постоянного тока составляет 280 В, при предельно допустимом значении 500 В. Также происходит увеличение токов в 1,4 раза по сравнению с предшествующим режимом работы. В связи с этим можно сделать вывод, что большая глубина провала приведет к увеличению размаха колебаний напряжения в звене постоянного тока до значения, превышающего предельно допустимое, и возрастанию токов, потребляемых АВ. ПЧ-АВ будет отключен внутренними защитами АВ.

Также при проведении экспериментальных исследований были получены массивы мгновенных значений токов и напряжений при работе сверхмощной ДСП-250 на различных стадиях плавки, при включении печного трансформатора на холостом ходу, при включении ФКЦ СТК. Анализ полученных экспериментальных данных показал, что на начальной стадии плавки в момент зажигания электрической дуги и расплавления коалдцев (рис.3), а также при включении печного трансформатора на холостом ходу (рис.4, а), возникает несимметрия напряжений на шинах 34,5 кВ. Коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности в начальный момент переходного процесса достигает 7% (рис.3).

В состав СТК входят фильтры 2-ой, 3-ей, 4-ой, 5-ой и 6-ой гармоник суммарной мощностью 330 МВАр. Одновременное включение всех фильтров приводит к перенапряжениям до 60% от номинального значения. В связи с этим на металлургическом заводе ЗАО «ММК Metalurji» применяется поэтапное включение фильтров. В начальный момент времени включают фильтры 2-ой, 3-ей гармоник и СТК, подключенные через один выключатель. Необходимо отметить, что в начальный момент времени импульсы управления на отпирание тиристоров ТРГ не подаются. После окончания переходного процесса (4 сек.) система управления подает импульсы управления на ТРГ. По окончании переходного процесса, вызванного подачей импульсов управления на ТРГ, производят включение фильтров 4-ой и 5-ой гармоник, затем после выдержки времени включают фильтр 6-ой гармоники.

Анализ экспериментальных данных показал, что применение поэтапного включения фильтров высших гармоник не исключает возникновение коммутационных перенапряжений, величина которых составляет 20-30% от номинального уровня напряжения (рис.4, б).

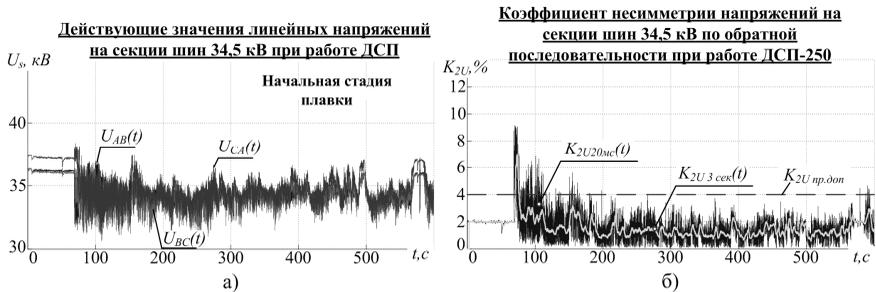


Рис.3. Графики изменения: а- напряжения на шинах 34,5 кВ при работе ДСП-250; б- коэффициента несимметрии напряжений на шинах 34,5 кВ при работе ДСП-250

Возникающие коммутационные перенапряжения оказывают негативное влияние на работу СУ АВ и могут привести к аварийному отключению главных электроприводов стана горячей прокатки 1750.

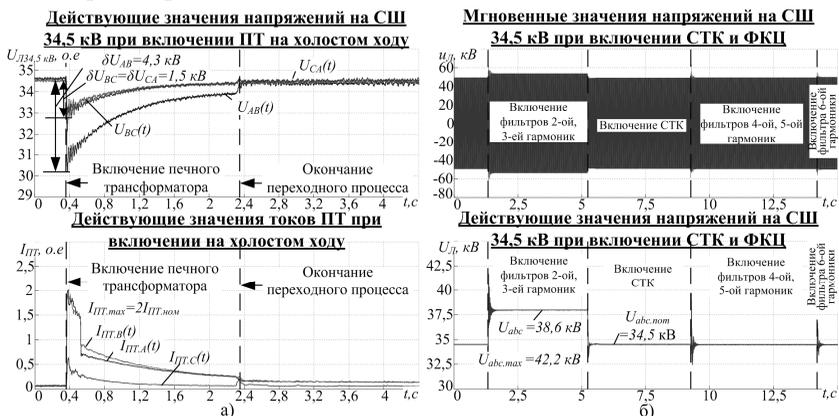


Рис.4. Графики изменения: а – действующие значения напряжений на шинах 34,5 кВ и токов, потребляемых ДСП при включении ПТ на холостом ходу; б – мгновенных и действующих значений напряжений на шинах 34,5 кВ при включении ФКЦ СТК

Полученные экспериментальные данные использованы при разработке имитационной модели комплекса «ДСП-СТК-ПЧ-АВ», а также при проведении исследований возможности параллельной работы электросталеплавильного и прокатного комплексов.

Третья глава диссертационной работы посвящена разработке имитационной модели электротехнического комплекса «Дуговая сталеплавильная печь – СТК – ПЧ-АВ». Для проверки эффективности использования способа повышения надежности работы ПЧ-АВ при несимметричных провалах напряжения за счет резервов реактивной мощности СТК была разработана математическая модель электросталеплавильного и прокатного комплексов. В качестве объекта исследования выбран СГП 1750, функционирующий на металлургическом заводе «ММК Metalurji». Схема электроснабжения завода показана на рис. 5.

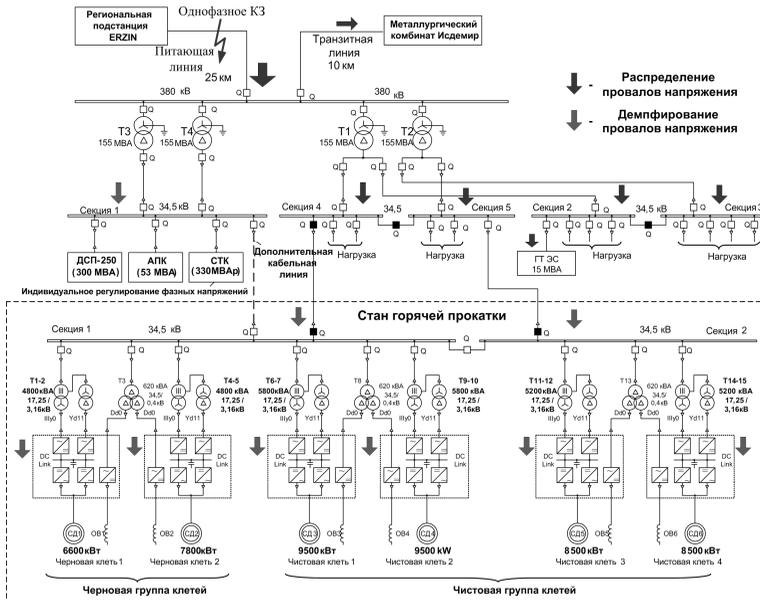


Рис.5. Упрощенная схема электроснабжения завода ЗАО «ММК Metalurji»

Имитационная модель электротехнического комплекса «ДСП-СТК-ПЧ-АВ» отличается от известных тем, что позволяет проводить исследования переходных процессов, протекающих в АВ при возникновении различных провалов напряжений в сети 380 кВ, а также исследования возможности повышения надежности АВ при компенсации провалов напряжения с помощью СТК 330 МВАр и возможности параллельной работы электросталеплавильного и прокатного комплексов.

В состав модели входят: модель питающей сети 380 кВ; модель главного электропривода СГП «1750», выполненная по двенадцатипульсной схеме выпрямления; имитационная модель ДСП-250, имитационная модель СТК-330 МВАр (рис.6).

Имитационная модель ДСП-250 представлена: моделью реактора; трансформатора; короткой сети; электрической дуги. Электрическая дуга представлена по методу Тельного, в виде двух встречно включенных управляемых источников ЭДС. Управляющие сигналы для источников ЭДС рассчитываются на основании экспериментально полученных массивов мгновенных значений токов, потребляемых ДСП-250 по формуле (1):

$$E_d = \sqrt{U_1^2 - (I_d'(t) \cdot X_3)^2} - I_d'(t) \cdot R_3, \quad (1)$$

где U_1 – напряжение сети 34,5 кВ, приведенное ко вторичной стороне печного трансформатора, кВ; X_s , R_s – эквивалентные реактивное и активное сопротивления, в приэлектродной области, Ом; I_d – действующее значение фазного тока дуги, рассчитанное по восстановленным реальным значениям мгновенных токов ДСП-250, А.

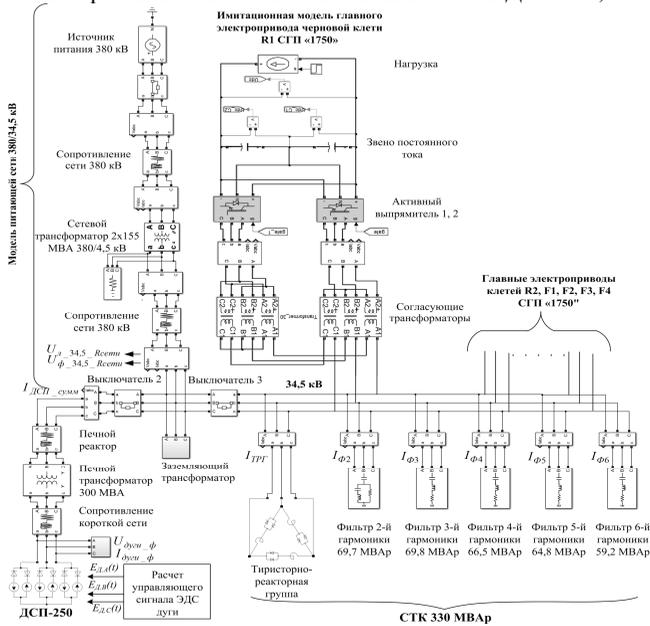


Рис.6. Имитационная модель электротехнического комплекса «ДСП-СТК-ПЧ-АВ»

Имитационная модель СТК представлена: фильтрами 2-ой, 3-ей, 4-ой, 5-ой и 6-ой гармоник, тиристорно-реакторной группой с системой управления с возможностью демпфирования провалов напряжения во внутривзаводской сети 34,5 кВ. Параметры фильтров и ТРГ получены из технической документации СТК-330 МВАр.

Имитационная модель главного электропривода СТП «1750» представлена: 1) моделью согласующих трансформаторов с последовательно включенными первичными обмотками; имитационной моделью силовой схемы трехуровневого АВ; 2) моделью звена постоянного тока, представленного в виде 2-х эквивалентных конденсаторов; 3) моделью СУ АВ. Система управления АВ выполнена 2-х контурной с внешним контуром регулирования напряжения в звене постоянного тока, в котором формируется ток задания по активной составляющей d , необходимый для поддержания напряжения в звене постоянного тока на заданном уровне, а также внутренним контуром регулирования токов по активной d и реактивной q составляющим. Управление ключами АВ осуществляется по методу ШИМ с удалением выделенных гармоник.

Для оценки адекватности разработанной модели было проведено сравнение результатов моделирования с результатами, полученными при проведении экспериментальных исследований. Оценка адекватности проводилась отдельно для работы ДСП-250 и СТК на основании сравнения действующих значений напряжений на секции шин 34,5 кВ, токов, потребляемых ДСП-250, и коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности. Проведенное сравнение показало сходимость результатов с погрешностью, не превышающей 5%. Проверка адекватности разработанной имитационной модели АВ проводилась на сравнении расчетных и экспериментальных переходных процессов сетевых токов АВ и напряжения в звене постоянного тока при воз-

никновении несимметричного провала напряжения в сети 380 кВ (рис.7). Погрешность расчетов также не превышает 5%.

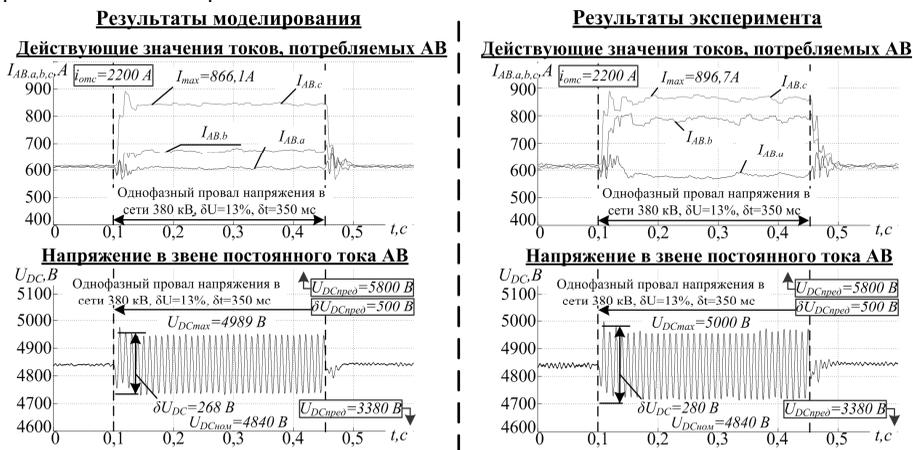


Рис. 7. Проверка адекватности разработанной имитационной модели ПЧ-АВ

Четвертая глава диссертационной работы посвящена исследованию режимов работы ПЧ-АВ при параллельной работе прокатного и электросталеплавильного комплексов. В рамках данных исследований на разработанной имитационной модели были проанализированы переходные процессы токов и напряжений в АВ при несимметричных провалах напряжения в сети 380 кВ, при демпфировании провалов напряжения во внутривзаводской сети 34,5 кВ с использованием СТК 330 МВАр, а также при параллельной работе ПЧ-АВ и ДСП-250 в течение цикла плавки.

Возникновение в питающей сети 380 кВ однофазного провала напряжения глубиной 30% вызывает увеличение токов, потребляемых АВ в 1,6 раза по сравнению с исходным режимом работы (рис.8, а), а также несимметрию токов по фазам. Несимметрия токов вызвана появлением обратной составляющей токов, которая приводит к колебаниям напряжения в звене постоянного тока, размах которых составляет 602 В при предельно допустимом значении 500 В (рис.8, а). Таким образом, однофазный провал напряжения в сети 380 кВ глубиной 30% приводит к отключению ПЧ-АВ защитой по напряжению в звене постоянного тока, либо токовой защитой АВ.

Применение СТК для демпфирования провалов напряжения во внутривзаводской сети позволяет снизить бросок тока в момент возникновения провала на 26% (до значения 1200 А). После окончания переходного процесса при компенсации провала напряжения действующие значения сетевых токов АВ не превышают номинального значения (рис.8, б). Размах колебаний напряжения в звене постоянного тока в начальный момент возникновения провала напряжения не превышает 240 В, затем снижается до 56 В (рис.8, б). Из проведенных исследований следует, что применение резервов реактивной мощности СТК для компенсации провалов напряжения во внутривзаводской сети 34,5 кВ позволяет сохранить устойчивую работу ПЧ-АВ при провале напряжения глубиной 30% в сети 380 кВ. С учетом режимов работы ДСП, компенсация провалов напряжения с помощью СТК обеспечивает сохранение устойчивости ПЧ-АВ в 74% случаев провалов напряжения, что не является достаточным техническим эффектом в условиях действующего производства.

На разработанной имитационной модели электротехнического комплекса «ДСП-СТК-ПЧ-АВ» были проведены исследования переходных процессов токов, потребляемых АВ, и напряжения в звене постоянного тока при параллельной работе главных электроприводов СГП и ЭСПЦ.

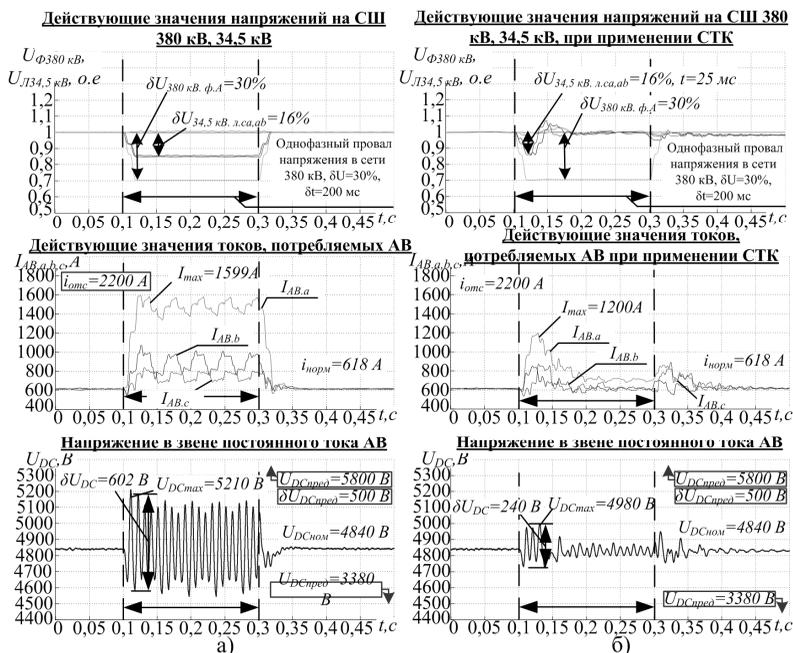


Рис.8. Графики переходных процессов токов, потребляемых АВ, и напряжения в звене постоянного тока при однофазном провале напряжения в сети 380 кВ глубиной 30%: а – без применения СТК; б – при применении СТК для демпфирования провалов напряжения в сети 34,5 кВ

Проведенные исследования показали, что при работе ДСП-250 на начальной стадии плавки вызванная несимметрия напряжений на шинах 34,5 кВ приводит к увеличению размаха колебаний напряжения в звене постоянного тока до 330 В, а также к несимметрии токов, потребляемых АВ. Необходимо отметить, что на протяжении всей стадии плавки размах колебаний напряжения в звене постоянного тока и токи, потребляемые АВ, не превысили значения уставок внутренних защит АВ. Ухудшение переходных процессов наблюдается при включении печного трансформатора на холостом ходу (рис.9, а). В момент включения ПТ возникает бросок тока, значение которого достигает 1290 А, что в 1,08 раза больше исходного значения потребляемых токов АВ. А также на протяжении всей длительности переходного процесса наблюдается несимметрия токов, которая приводит к увеличению размаха колебаний напряжения в звене постоянного тока до 310 В (рис.9, а). Бросок тока намагничивания зависит от остаточной намагниченности магнитопровода и момента включения ПТ, и может достигать трехкратного значения номинального тока ПТ, который приводит к дополнительным провалам напряжения питающей сети глубиной до 13%, что оказывает негативное влияние на работу СУ АВ в составе главных электроприводов клетей СГП «1750».

Коммутационные перенапряжения, вызванные включением ФКЦ СТК, приводят к отключению ПЧ-АВ внутренними защитами АВ. Аварийное отключение вызвано броском тока, потребляемого АВ, в момент включения ФКЦ и перенапряжения в звене постоянного тока (рис.9, б).

Из проведенных исследований параллельной работы ЭСПЦ и СГП «1750» следует, что необходима разработка технических мероприятий, направленных на сохранение устойчивой работы АВ при возмущениях, вызванных работой ДСП-250.

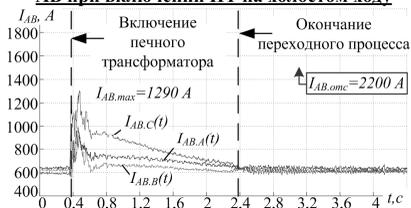
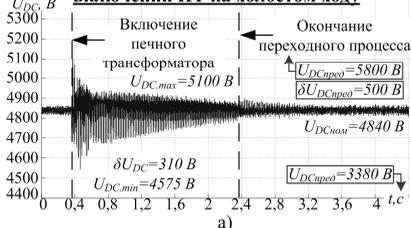
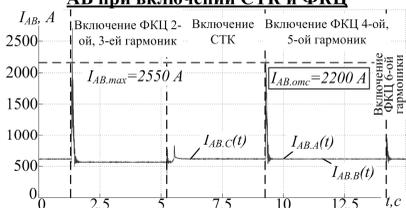
Действующие значения токов, потребляемых**АВ при включении ПТ на холостом ходу****Напряжение в звене постоянного тока при включении ПТ на холостом ходу****Действующие значения токов, потребляемых****АВ при включении СТК и ФКЦ****Напряжение в звене постоянного тока при включении СТК и ФКЦ**

Рис.9. Графики переходных процессов токов, потребляемых АВ и напряжения в звене постоянного тока: а- при включении ПТ на холостом ходу; б- при включении ФКЦ СТК

Пятая глава посвящена разработке усовершенствованной системы управления АВ со стабилизирующим эффектом при возмущениях напряжения питающей сети и оценке эффективности разработанной СУ.

Для повышения устойчивости работы АВ при возмущениях напряжения на шинах 34,5 кВ, вызванных работой ДСП-250, было предложено в существующую СУ АВ добавить контур регулирования токов по обратной последовательности и контур регулирования тока по реактивной составляющей прямой последовательности (рис. 10).

Схема регулирования сетевых токов в разработанной СУ представлена контуром регулирования токов прямой последовательности по активной d и реактивной q составляющим. Ток задания по активной составляющей $I_{d,зад}^+$ формируется во внешнем контуре регулирования напряжения в звене постоянного тока, ток задания по реактивной составляющей $I_{q,зад}^+$ во внешнем контуре регулирования напряжения сети. Токи задания обратной последовательности по активной $I_{d,зад}^-$ и реактивной $I_{q,зад}^-$ составляющим равны 0.

Для выделения токов прямой и обратной последовательностей трехфазная система координат abc преобразуется в двухфазную систему координат $\alpha\beta$, по выражению (2) производится вычисление токов прямой и обратной последовательностей с введением задержки по времени $\Delta t = 5$ мс:

$$\begin{cases} I_{\alpha}^+ = \frac{1}{2} \cdot (I_{\alpha} - I_{\beta} \cdot (t - \Delta t)); \\ I_{\beta}^+ = \frac{1}{2} \cdot (I_{\beta} + I_{\alpha} \cdot (t - \Delta t)); \\ I_{\alpha}^- = \frac{1}{2} \cdot (I_{\alpha} + I_{\beta} \cdot (t - \Delta t)); \\ I_{\beta}^- = \frac{1}{2} \cdot (I_{\beta} - I_{\alpha} \cdot (t - \Delta t)). \end{cases} \quad (2)$$

После выделения токов прямой и обратной последовательностей, производится преобразование токов во вращающуюся систему координат dq^+ и dq^- , формируются напряжения на входе АВ, по которым рассчитываются импульсы управления ключами АВ.

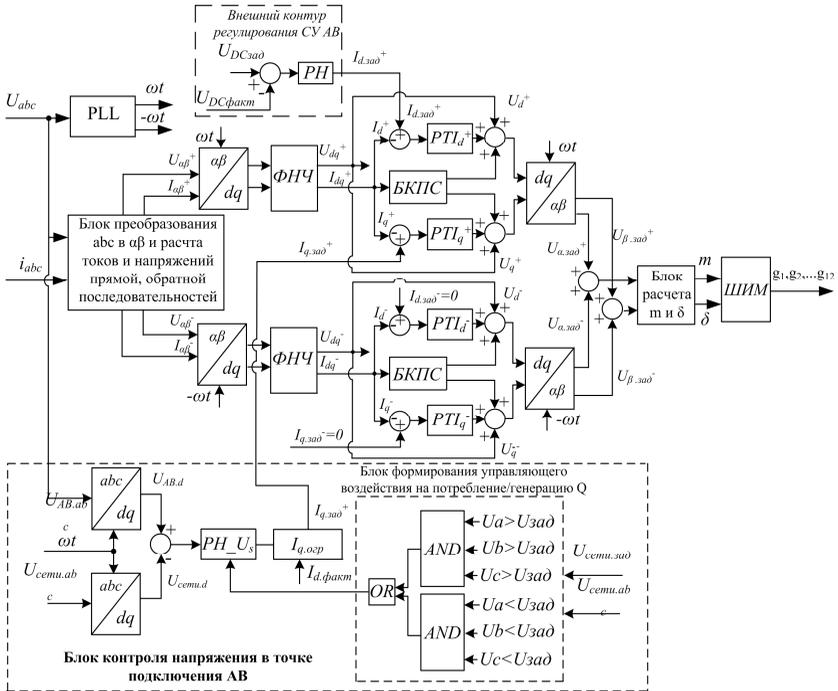


Рис.10. Структурная схема усовершенствованной СУ АВ со стабилизирующим эффектом при отклонениях напряжения питающей сети

В контуре регулирования напряжения сети производится сравнение напряжения с напряжением на входе АВ, сигнал рассогласования которых обрабатывается ПИ-регулятором, и формируется ток задания по реактивной составляющей прямой последовательности $I_{q,зад}^+$. Параметры регулятора рассчитаны по методике для настройки динамического компенсатора искажения напряжения (ДКИН) по формулам (3) и (4):

$$k_{PI} = \sqrt{2} \cdot k_{тр} \cdot \omega_n \cdot L_{тр}; \quad (3)$$

$$k_{II} = k_{тр} \cdot \omega_n^2 \cdot L_{тр}, \quad (4)$$

где $k_{мп}$ - коэффициент трансформации согласующего трансформатора; ω_n - незатухающая частота системы; $L_{тр}$ - индуктивность согласующего трансформатора.

При возникновении несимметричных провалов напряжения в блоке диагностики напряжения сети формируется ток задания по реактивной составляющей прямой последовательности $I_{q,зад}^+$ на генерацию реактивной мощности, которая позволяет коэффициенту модуляции не превышать предельно допустимых значений. Контур регулирования токов по обратной последовательности компенсирует токи обратной последовательности, в связи с чем происходит снижение размахов колебаний напряжения в звене постоянного тока. При возникновении перенапряжений СУ переводит АВ в режим потребления реактивной мощности.

Для проведения оценки эффективности разработанной СУ были проведены исследования переходных процессов токов и напряжения в звене постоянного тока при включении ПТ на холостом ходу и при коммутационных перенапряжениях, вызванных включением ФКЦ СТК. Применение усовершенствованной СУ позволяет снизить бросок тока в момент включения ПТ на 22,6%. При этом токи, потребляемые АВ на протя-

жении всего переходного процесса симметричны по фазам (рис.11, а). Максимальный размах колебаний напряжения в звене постоянного тока составил 153 В, что на 50% меньше чем при использовании существующей СУ (ри.11, а).

Улучшение переходных процессов наблюдается и при включении ФКЦ СТК, бросок тока составил 1850 А, что на 27,5% меньше чем при применении существующей СУ (рис.11,б). Максимальное напряжение в звене постоянного тока составило 5650 В, что не превышает значения уставки срабатывания защит АВ.

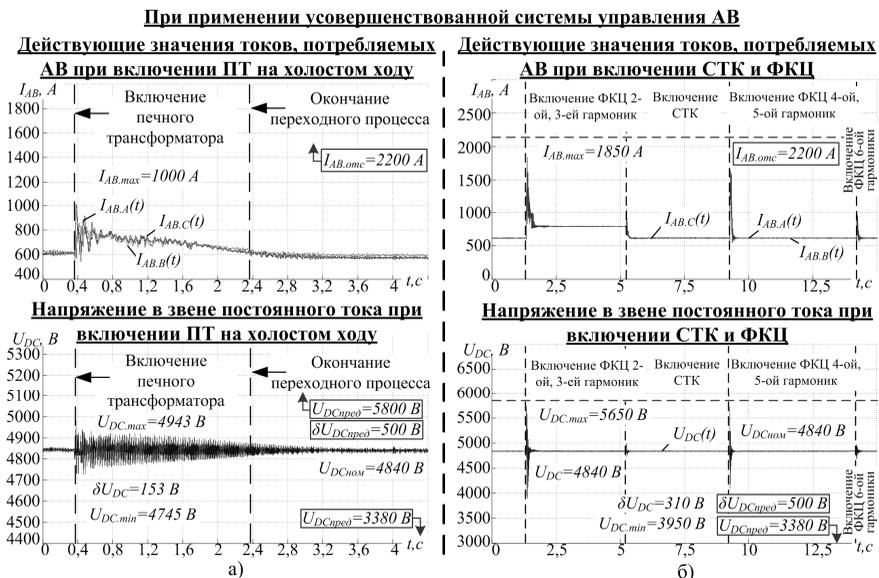


Рис. 11. Графики переходных процессов токов, потребляемых АВ и напряжения в звене постоянного тока при применении усовершенствованной СУ: а – при включении ПТ на холостом ходу; б – при включении ФКЦ СТК

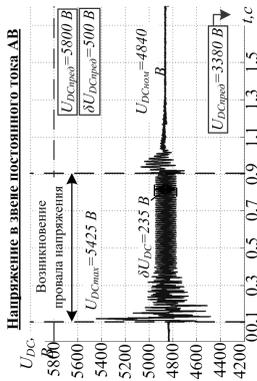
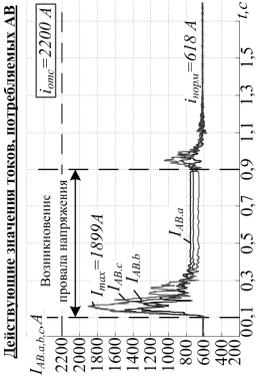
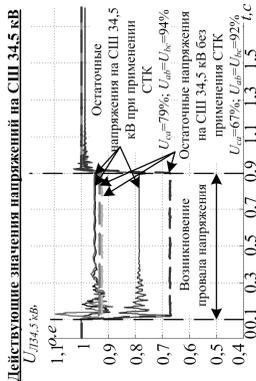
Разработанная СУ позволяет повысить устойчивость работы ПЧ-АВ при возмущениях напряжения сети, вызванных работой электросталеплавильного комплекса, а также избежать аварийного отключения при коммутационных перенапряжениях при включении ФКЦ СТК.

Был проведен анализ переходных процессов токов и напряжения в звене постоянного тока при совместном использовании СТК и усовершенствованной СУ АВ при возникновении в сети 380 кВ однофазного провала напряжения глубиной 50% (рис. 12).

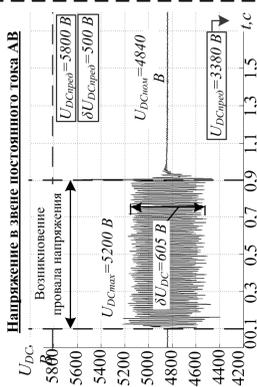
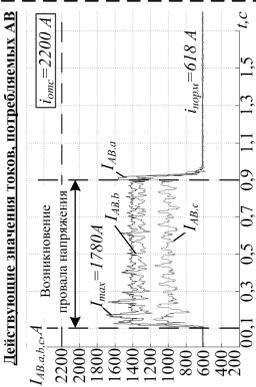
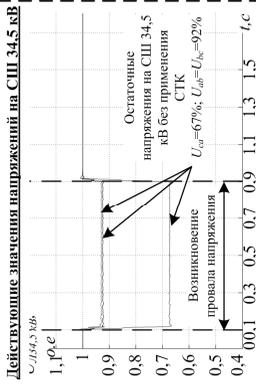
Анализ переходных процессов токов, потребляемых АВ, и напряжения в звене постоянного тока при однофазном провале напряжения в сети 380 кВ глубиной 50% показал, что при совместном применении СТК и усовершенствованной СУ АВ для повышения устойчивости работы АВ бросок токов в момент возникновения провала напряжения не превысил 1899 А (рис.12, в). Токи, потребляемые АВ после окончания переходного процесса, симметричны по фазам и не превышают номинального тока АВ. Размах колебаний напряжения в звене постоянного тока не превышает 235 В, после окончания переходного процесса меньше 100 В (рис.12, в).

Из проведенных исследований видно, что совместное использование СТК и разработанной СУ АВ позволяет сохранить устойчивую работу при несимметричных провалах напряжения в сети 380 кВ глубиной до 50%, тем самым избежать аварийных остановов электроприводов СГП «1750» в 90% случаев возникновения провалов напряжений, что является значительным техническим эффектом.

Совместное использование СТК и усовершенствованной СУ АВ



При применении усовершенствованной СУ АВ



При применении СТК

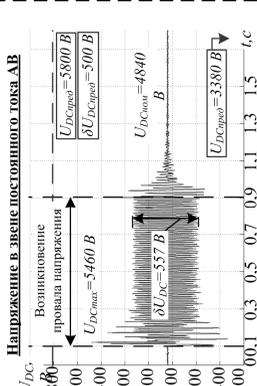
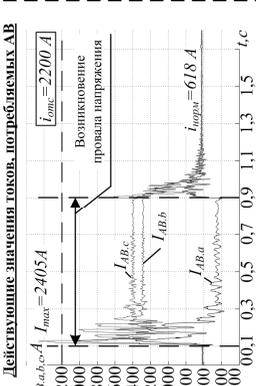
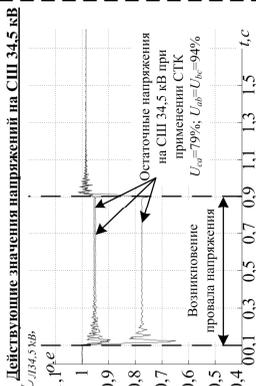


Рис.12. Сравнительный анализ переходных процессов токов, потребляемых АВ и напряжения в звене постоянного тока при однофазном провале напряжения в сети 380 кВ глубиной 50%

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИИ

1. Проведен анализ существующих способов снижения негативного влияния несимметрии напряжения питающей сети на работу ПЧ-АВ в составе электроприводов большой мощности. Большинство способов направленных на повышение устойчивости работы ПЧ-АВ при несимметрии напряжения питающей сети основаны на усовершенствовании СУ АВ с помощью введения предмодулирующих сигналов по напряжению обратной последовательности, сигнала напряжения третьей гармоники, напряжения сети, ориентированного по вектору напряжения обратной последовательности. Также возможен перевод АВ в диодный режим работы при возникновении несимметрии напряжения сети. Кроме того, предложен способ повышения устойчивости ПЧ-АВ в составе электроприводов прокатных станков за компенсации провалов напряжения с помощью СТК для ДСП, при котором необходимо объединение ДСП и электроприводов прокатного стана на базе ПЧ-АВ на параллельную работу с питанием от общих секций ГПП. Однако для оценки возможности предложенного способа необходимо проведение дополнительных исследований, доказывающих возможность параллельной работы ПЧ-АВ и ДСП при наличии дополнительных колебаний напряжения при работе ДСП, а также при коммутации силового оборудования ДСП и СТК.

2. Получены результаты экспериментальных исследований, показывающие влияние несимметрии напряжения сети, вызванной внешними провалами напряжения в сети 380 кВ на работу ПЧ-АВ. Анализ переходных процессов показал, что однофазный провал напряжения в сети 380 кВ глубиной 13% приводит к увеличению несимметрии токов, потребляемых АВ. А также составляющая обратной последовательности токов вызывает колебания напряжения в звене постоянного тока, амплитуда которых составляет 6% от номинального значения. Получены мгновенные значения токов, потребляемых ДСП-250 и напряжений в точке подключения печи, за цикл плавки и коммутации основного электрооборудования электросталеплавленного цеха. При работе печи наблюдается несимметрия напряжения на шинах 34,5 кВ, коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности достигает 7%. При включении ФКЦ СТК возникают перенапряжения, которые достигают 20-30% от номинального уровня.

3. Разработана усовершенствованная имитационная модель комплекса «ДСП-СТК-ПЧ-АВ», которая позволяет проводить исследования переходных процессов, протекающих в ПЧ-АВ при отклонениях напряжения сети, вызванных: внешними провалами напряжения, работой ДСП, а также при коммутации основного электрооборудования комплекса ДСП-СТК.

4. На разработанной усовершенствованной имитационной модели комплекса «ДСП-СТК-ПЧ-АВ» проведены исследования возможности параллельной работы ДСП и ПЧ-АВ при работе печи, включении ПТ на холостом ходу, коммутационных перенапряжениях, вызванных включением ФКЦ СТК. Исследования показали, что несимметрия напряжений, вызванная работой печи и включением ПТ приводит к несимметрии токов, потребляемых АВ, и увеличению размаха колебаний напряжения в звене постоянного тока. Включение ФКЦ СТК приводит к аварийному отключению ПЧ-АВ внутренними защитами АВ.

5. Разработана усовершенствованная система управления АВ в составе ПЧ-АВ со стабилизирующим эффектом при возмущениях напряжения в точке подключения ПЧ. В системе управления реализован контур регулирования тока по реактивной составляющей, а также контур регулирования ортогональных составляющих тока по прямой и обратной последовательностям. Проведена оценка эффективности разработанной СУ АВ при включении ПТ на холостом ходу и при перенапряжениях, вызванных включением ФКЦ СТК. Анализ переходных процессов показал, что разработанная СУ позволяет повысить устойчивость АВ при несимметрии напряжений, вызванной работой ДСП-250, а также избежать аварийного отключения АВ при включении ФКЦ СТК.

6. Проведены исследования при совместном использовании резервов СТК и разработанной СУ АВ в составе ПЧ-АВ для повышения устойчивости главных электропри-

