

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.324.05,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ «МАГНИТОГОРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Г.И. НОСОВА», МИНИСТЕРСТВО
НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЁНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 20.12.2024 №8

О присуждении Денисевичу Александру Сергеевичу, гражданину Российской Федерации, учёной степени кандидата технических наук.

Диссертация «Повышение устойчивости электроприводов прокатного стана при параллельной работе с дуговой сталеплавильной печью» по специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы принята к защите 01 октября 2024 г. (протокол № 6) диссертационным советом 24.2.324.05, созданным на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, приказ № 508/нк от 24.03.2023 г.

Соискатель Денисевич Александр Сергеевич, 20 июня 1993 года рождения. В 2021 году соискатель окончил обучение в аспирантуре ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» по научной специальности 05.09.03- Электротехнические комплексы и системы.

Работает в должности главного специалиста службы транспорта электроэнергии ПАО «Россети Урал» - филиал «Челябэнерго» производственное отделение «Магнитогорские электрические сети».

Диссертация «Повышение устойчивости электроприводов прокатного стана при параллельной работе с дуговой сталеплавильной печью» выполнена на кафедре автоматизированного электропривода и мехатроники ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Министерство науки и высшего образования РФ.

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент Николаев Александр Аркадьевич, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», кафедра автоматизированного электропривода и мехатроники, заведующий кафедрой.

Официальные оппоненты:

1. Мещеряков Виктор Николаевич – доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», кафедра автоматизированного электропривода и робототехники, заведующий кафедрой;

2. Шевырёв Юрий Вадимович – доктор технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет “МИСиС”», кафедра «Энергетика и энергоэффективность горной промышленности», профессор.

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация - ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет» (научно-исследовательский университет), г. Челябинск, в своем положительном отзыве, подписанным Дудкиным Максимом Михайловичем, доктором технических наук, заместителем заведующего кафедрой «Электропривод, мехатроника и электромеханика», указала, что диссертация Денисевича Александра Сергеевича «Повышение устойчивости электроприводов прокатного стана при параллельной работе с дуговой сталеплавильной печью» соответствует всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям в соответствии с п.п. 9–14 «Положения о присуждении ученых степеней» от 24.09.2013 г. № 842 (в редакции от 25.01.2024г), представляет собой решение актуальной задачи по повышению устойчивости электроприводов прокатного стана при параллельной работе с дуговой сталеплавильной печью, а её автор, Денисевич Алек-

сандр Сергеевич, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы.

Соискатель имеет 35 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 9 работ, из них: 3 в журналах из перечня рецензируемых научных изданий, рекомендованного ВАК, 3 публикаций, входящих в систему цитирования Scopus, по теме диссертации получен 1 патент на изобретение и 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ. Сведения об опубликованных работах достоверны.

Авторский вклад соискателя заключается в: разработке усовершенствованной имитационной модели электротехнического комплекса «Дуговая сталеплавильная печь - статический тиристорный компенсатор - преобразователь частоты с активным выпрямителем» («ДСП-СТК-ПЧ-АВ»), позволяющей проводить исследования влияния несимметрии напряжения питающей сети на работу ПЧ-АВ, возможности совместной работы ДСП и группы электроприводов стана горячей прокатки (СП) «1750», влияния коммутационных процессов, возникающих при включении печного трансформатора (ПТ) на холостом ходу, а также при включении фильтрокомпенсирующих цепей (ФКЦ) СТК; получении результатов исследований, доказывающих возможность параллельной работы главных электроприводов прокатного стана и ДСП; разработке усовершенствованной системы управления АВ в составе ПЧ-АВ с внешним контуром регулирования тока по реактивной составляющей и контуром регулирования ортогональных составляющих токов обратной последовательности, обеспечивающую устойчивость при сильных отклонениях напряжения питающей сети; доказательстве эффективности применения усовершенствованной системы управления АВ при внешних возмущениях напряжения питающей сети и при параллельной работе с ДСП.

Наиболее значимые работы по теме диссертации:

1. Николаев, А.А. Исследование параллельной работы автоматизированных электроприводов прокатного стана и дуговой сталеплавильной печи / А.А. Николаев, **А.С. Денисевич**, М.В. Буланов // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2017. – №3. – С. 59-69.

2. Николаев, А.А. Повышение устойчивости работы преобразователей частоты с активными выпрямителями при коммутациях электрооборудования электросталеплавильного комплекса / А.А. Николаев, **А.С. Денисевич**, В.С. Ивекеев // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2019. – №5. – С. 48-58.

3. Николаев, А.А. Повышение устойчивости преобразователей частоты с активными выпрямителями при провалах напряжения и параллельной работе с дуговой сталеплавильной печью / А.А. Николаев, **А.С. Денисевич**, И.А. Ложкин, В.А. Лаптова // Электротехнические системы и комплексы. – 2020. - №3 (48). – С.33-40.

4. Патент на изобретение № 2793193. Устройство управления высоковольтным преобразователем частоты с активным выпрямителем / А.А. Николаев, **А.С. Денисевич**; №2022132190; заяв. 09.12.2022; опубл. 29.03.2023.

На диссертацию и автореферат поступило 7 отзывов, все положительные:

1. Отзыв ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II» г. Санкт-Петербург (д.т.н., доцент Ю. А. Сычев):

1) Какие допущения и ограничения были приняты при разработке имитационной модели электротехнического комплекса «ДСП-СТК-ПЧ-АВ», приведенной на рис.6 (стр.12 автореферата)? 2) Рассматривались ли в процессе исследований меры по совершенствованию режима работы СТК в части подавления колебаний напряжения, и если проводились, то какие? 3) По каким показателям и критериям оценивался уровень устойчивости работы ПЧ-АВ.

2. Отзыв ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», г.Воронеж (д.т.н., профессор А.М. Литвиненко): В автореферате отсутствуют данные о методах формирования и допущениях, принятых при разработке имитационных моделей электротехнического комплекса

3. Отзыв ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», г.Магнитогорск (к.т.н. А.Ю. Юдин): 1) В автореферате приводятся графики с изменением коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности на секциях 34,5 кВ ГПП. Расчет коэффициентов произведен с усреднением на 3 секундных интервалах. В существующем ГОСТ 32144-2013 расчет

коэффициента несимметрии K_{2U} осуществляется с усреднением на 10 минутных интервалах. Чем обусловлено использование меньшего интервала усреднения K_{2U} ? 2) Чем обусловлено наличие установившихся колебаний напряжения в звене постоянного тока ПЧ-АВ при наличии несимметрии напряжения на входе силового преобразователя? 3) Как влияют режимы работы электроприводов клеток стана на устойчивость ПЧ-АВ при провалах напряжения?

4. Отзыв ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург (к.т.н., доцент А.В. Костылев): 1) В автореферате не описаны альтернативные способы сохранения устойчивости работы электроприводов прокатных станов на базе ПЧ-АВ при провалах напряжения. 2) На стр.15 в автореферате сказано, что в усовершенствованной системе управления АВ используются два различных преобразования для вращающейся систем координат dq^+ и dq^- . В чем их отличие? 3) Оценивалось ли в работе совокупное влияние высших гармоник в напряжении сети, создаваемых работой ДСП, СТК и группы ПЧ-АВ на устойчивость работы усовершенствованной системы управления АВ.

5. Отзыв ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа (д.т.н., доцент Р.Р. Саттаров): 1) В автореферате упоминается, что при включении фильтров высших гармоник СТК возникают перенапряжения, уровень которых достигает 20-30% от номинального. Рассматривались в работе альтернативные способы снижения уровня перенапряжения например, за счет изменения алгоритма включения фильтров? 2) В автореферате не представлен анализ работы ПЧ-АВ с разработанной усовершенствованной системой управления при наличии резонансов в частотной характеристике питающей сети.

6. Отзыв ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», г. Уфа (д.т.н., профессор Ф.А. Гизатуллин): 1) Учитывались ли в разработанной имитационной модели электрического контура ДСП-250 нелинейные свойства электрических дуг и случайные колебания токов? 2) Каково влияние параметров

системы электроснабжения на критический уровень провалов напряжения, при котором нарушается устойчивость работы электроприводов.

7. Отзыв ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», г. Нижний Новгород (д.т.н., профессор Г.Я. Вагин, к.т.н., доцент А.А. Севостьянов): 1) Как на имитационной модели проводились исследования режимов работы ПЧ-АВ при коммутационных перенапряжениях, вызванных включением фильтров высших гармоник в составе СТК? Использовались ли полученные экспериментальные массивы мгновенных значений напряжения сети 34,5 кВ или производилось прямое моделирование включения фильтров высших гармоник с известными параметрами с расчетом мгновенных значений токов и напряжений. 2) Нужно ли после добавления дополнительного контура регулирования ортогональных составляющих тока обратной последовательности производить перенастройку контура регулирования напряжения в звене постоянного тока ПЧ-АВ.

8. Отзыв Череповецкий металлургический комбинат ПАО «Северсталь», г.Череповец (Д.А. Цветков): (вопросы и замечания) 1) В автореферате приведены результаты исследований режимов работы ПЧ-АВ при однофазном провале напряжения глубиной 50%, доказывающие эффективность разработанной усовершенствованной системы управления АВ при совместном использовании СТК. При какой максимальной глубине провала напряжения сохраняется устойчивая работа ПЧ-АВ при использовании только разработанной системы управления АВ? 2) Возможно ли применение разработанной усовершенствованной системы управления АВ не только для преобразователей частоты фирмы АВВ серии ACS6000, но и других фирм преобразовательной техники?

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается широкой известностью их научных достижений в области силовой электроники, преобразовательной техники, электроприводов с активными выпрямителями, использующимися для улучшения их режимов работы и снижения их влияния на качество электроэнергии. Профессор, д-р техн. наук В.Н. Мещеряков является специалистом в разработке энергоэффективных электротехнических и электро-

приводных комплексов и систем. Доцент, д-р техн. наук Ю.В. Шевырѐв признанный специалист в области автоматизированного электропривода и в области повышения качества электрической энергии при работе полупроводниковых преобразователей.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработаны: имитационная модель электротехнического комплекса «ДСП-СТК-ПЧ-АВ», позволяющая проводить исследования влияния несимметрии напряжения питающей сети на работу ПЧ-АВ, исследования возможности совместной работы ДСП и группы электроприводов прокатного стана, выполненных на базе высоковольтных ПЧ-АВ и синхронных электродвигателях (СД), подключенных от одной секции шин, проводить исследования влияния коммутационных процессов при включении печного трансформатора ДСП на холостом ходу, при включении фильтров высших гармоник СТК; усовершенствованная система управления силовыми ключами активного выпрямителя в составе ПЧ-АВ, отличающаяся от известных тем, что для повышения устойчивости работы ПЧ-АВ при возмущениях напряжения питающей сети реализован дополнительный контур регулирования ортогональных составляющих токов обратной последовательности и внешний контур регулирования сетевого тока по реактивной составляющей прямой последовательности;

предложены оригинальные научно-обоснованные технические решения по повышению устойчивости электроприводов клетей прокатных станов, выполненных на базе высоковольтных ПЧ-АВ и СД при колебаниях и провалах напряжения в точке подключения, за счет применения усовершенствованной системы управления силовыми ключами АВ, позволяющей снизить негативное влияние несимметрии напряжения на работу электроприводов на базе ПЧ-АВ и СД;

доказана эффективность предложенного способа повышения устойчивости электроприводов прокатного стана при совместной работе со сверхмощной ДСП и при несимметричных провалах напряжения в питающей сети;

даны рекомендации по повышению устойчивости работы электроприводов на базе ПЧ-АВ и СД при несимметричных провалах напряжения питающей сети и при совместной работе с дуговой сталеплавильной печью, позволяющие сократить число аварийных отключений главных электроприводов клетей прокатного стана из-за отклонений напряжения в точке подключения. Результаты диссертационной работы рекомендованы к внедрению на аналогичных металлургических предприятиях, имеющих в своем составе электроприводы прокатных станов на базе ПЧ-АВ и мощные дуговые печи с СТК.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказана возможность повышения устойчивой работы электроприводов прокатного стана на базе ПЧ-АВ при совместной работе с ДСП; при провалах напряжения во внешней электроэнергетической системе, за счет применения усовершенствованной системы управления силовыми ключами АВ со стабилизирующим эффектом при отклонениях напряжения;

применительно к проблематике диссертации эффективно использованы методы имитационного моделирования и экспериментальных исследований, выполненных в условиях действующего производства на металлургическом заводе ЗАО «ММК Metalurji», г. Дёртиол, Турция;

изложена идея повышения устойчивости работы электроприводов прокатного стана на базе ПЧ-АВ и СД при отклонениях напряжения, за счет применения усовершенствованной системы управления силовыми ключами АВ, в которой реализованы: дополнительный контур регулирования ортогональных составляющих токов обратной последовательности и внешний контур регулирования сетевого тока реактивной составляющей прямой последовательности;

раскрыты причины аварийных отключений электроприводов на базе ПЧ-АВ при несимметричных провалах напряжения питающей сети, а также при отклонениях и возмущениях напряжения, вызванных работой ДСП, включением печного трансформатора ДСП, включением фильтров высших гармоник СТК;

изучено влияние несимметричных провалов, отклонений напряжения и перенапряжения в точке подключения силового преобразователя с АВ, вызванных

короткими замыканиями в линиях электропередач, работой ДСП, а также включением печного трансформатора и фильтров высших гармоник СТК на работу системы управления АВ.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработаны и рекомендованы к внедрению: усовершенствованная система управления АВ с дополнительным контуром регулирования ортогональных составляющих токов обратной последовательности и внешним контуром регулирования сетевого тока по реактивной составляющей прямой последовательности, обеспечивающая устойчивую работу ПЧ-АВ при возмущениях напряжения питающей сети;

определена: эффективность применения усовершенствованной системы управления АВ в ПЧ-АВ главных электроприводов прокатных станов. На примере металлургического завода ЗАО «ММК Metalurji» доказано, что разработанная система управления АВ позволяет повысить устойчивость ПЧ-АВ при совместной работе с ДСП, при однофазных провалах напряжения глубиной до 30%, а при совместном использовании с СТК и усовершенствованной системы управления АВ в составе ПЧ-АВ при провалах напряжения глубиной до 50%. Технический эффект от внедрения разработанной системы управления АВ и совместного использования с СТК заключается в уменьшении количества простоев стана горячей прокатки 1750, вызванных провалами напряжения питающей сети. Вероятность сохранения устойчивой работы главных электроприводов прокатного стана 1750 при использовании усовершенствованной системы управления АВ при возникновении провалов напряжения во внешней питающей сети 380 кВ, составляет 75%, при совместном использовании с СТК 90%;

получены результаты теоретических исследований, доказывающие возможность совместной работы электроприводов прокатных станов на базе ПЧ-АВ и ДСП за счет применения разработанной усовершенствованной системы управления силовыми ключами АВ со стабилизирующим эффектом при отклонениях напряжения в точке общего подключения;

представлены: рекомендации по настройке системы управления с дополнительным контуром регулирования ортогональных составляющих токов обратной последовательности и внешним контуром регулирования сетевого тока реактивной составляющей прямой последовательности;

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

корректность применения математического аппарата; теоретические исследования выполнены с использованием реальных технических характеристик силового электрооборудования ПЧ-АВ электроприводов прокатного стана, сверхмощной ДСП-250, СТК 330 МВАр и системы внутризаводского электроснабжения при правомерных исходных положениях и обоснованных допущениях;

теория основывается на известных положениях теории автоматического управления, методах теории электрических цепей, положениях теории силовой электроники и электрических машин, а также методах математического моделирования;

идея базируется на использовании разложения обратной связи сетевого тока АВ на прямую и обратную последовательности, с целью компенсации обратной последовательности сетевого тока, возникающей при несимметрии напряжения в точке подключения, а также на использовании свойств активного выпрямителя работать в режимах генерирования или потребления реактивной мощности;

выполнено сравнение результатов исследований, полученных автором, с результатами, представленными в патентных и литературных источниках, посвященных вопросам повышения устойчивости работы электроприводов на базе ПЧ-АВ при несимметрии питающего напряжения;

установлено качественное и количественное совпадение результатов математического моделирования с экспериментальными данными, полученными на действующем металлургическом заводе с электроприводами на базе ПЧ-АВ, мощной ДСП с СТК;

использованы современные методы имитационного моделирования с применением математического пакета Matlab.

Личный вклад соискателя состоит в: постановке целей и задач исследования; разработке усовершенствованной имитационной модели комплекса «ДСП-СТК-ПЧ-АВ», позволяющей проводить исследования влияния отклонений напряжения, вызванных работой ДСП и внешними возмущающими воздействиями со стороны электроэнергетической системы; проведении исследований, доказывающих возможность совместной работы главных электроприводов клетей прокатного стана на базе ПЧ-АВ и электросталеплавильного комплекса на базе мощной ДСП-250 со статическим тиристорным компенсатором; разработке усовершенствованной системы управления АВ в составе ПЧ-АВ с дополнительным контуром регулирования ортогональных составляющих токов обратной последовательности и внешним контуром регулирования сетевого тока реактивной составляющей прямой последовательности, обеспечивающей устойчивость при провалах напряжения питающей сети и при параллельной работе с ДСП.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания:

В отзыве ведущей организации:

1. В третьей главе разработана имитационная модель электрического контура ДСП с учетом случайного характера изменения длин электрических дуг. В качестве исходных данных для этой модели использованы массивы мгновенных значений токов дуг, полученные на действующей ДСП-250 (300 МВА). Получены ли данные экспериментальные массивы для наихудшего режима работы ДСП со значительными колебаниями токов дуг и максимальной частотой коротких замыканий, при которых колебания напряжения сети 34,5 кВ будут максимальными? Осуществлялся ли отбор наиболее тяжелых плавок с максимальными колебаниями токов дуг и реактивной мощности ДСП или использовались экспериментальные данные, полученные в рамках единственной тестовой плавки?

2. В пятой главе при исследовании эффективности усовершенствованной системы управления АВ проведена оценка переходных процессов при однофазном провале напряжения в сети 380 кВ глубиной 50%. Проводились ли аналогичные исследования для двухфазных и трехфазных провалов напряжения?

3. В работе отсутствует подробное описание методики настройки контуров регулирования усовершенствованной системы управления АВ. Потребуется ли при внедрении усовершенствованной системы управления АВ пересчёт параметров регуляторов ортогональных составляющих прямой и обратной последовательностей сетевого тока, а также регулятора напряжения в звене постоянного тока?

4. В работе не рассмотрены варианты использования дополнительного СТК или компенсатора типа СТАТКОМ для подключения к секциям 34,5 кВ главной понизительной подстанции предприятия, от которых запитаны электроприводы стана 1750, без использования существующего СТК для ДСП-250.

5. Проводилась ли оценка степени влияния высших гармоник напряжения на общих секциях, питающих ДСП и электроприводы прокатного стана, на стабильность работы контуров регулирования ортогональных составляющих сетевых токов АВ при использовании усовершенствованной системы управления?

В отзыве официального оппонента Мещерякова В.Н.:

1. В 1-ой главе при анализе существующих способов сохранения устойчивости работы ПЧ-АВ рассматриваются системы управления активных выпрямителей, в которых применяются предмодулирующие сигналы по напряжению. За счет чего достигается повышение устойчивости работы ПЧ-АВ при их применении?

2. Во 2-ой главе идет сравнение режимов работы ДСП при включенном и отключенном СТК. Для рассматриваемой ДСП-250 возможна длительная работа без СТК?

3. Третья глава диссертационной работы посвящена разработке усовершенствованной имитационной модели электротехнического комплекса «Дуговая сталеплавильная печь – СТК - ПЧ - АВ», в котором модель дуги представлена по методу Тельного (с помощью противо-ЭДС). Рассматривались ли другие способы моделирования электрической дуги, например с помощью уравнения Касси?

4. В 4-ой главе диссертации приведено сравнение переходных процессов сетевых токов и напряжения в звене постоянного тока АВ при провалах напряжения при существующей СУ АВ, а также при использовании СТК с усовер-

шенствованной системой управления. Нет подробного описания усовершенствованной системы управления СТК для демпфирования провалов напряжения.

5. В работе разработана усовершенствованная СУ АВ с дополнительным контуром регулирования ортогональных составляющих тока обратной последовательности и внешним контуром регулирования сетевого тока по реактивной составляющей прямой последовательности при использовании алгоритма ШИМ с удалением выделенных гармоник. Возможно использование в разработанной СУ АВ других алгоритмов ШИМ, например, ШИМ с фиксированными углами переключений?

6. По какой причине система управления СТК не обеспечивает демпфирование перенапряжений при включении фильтров высших гармоник в составе ФКЦ? В 4-ой главе диссертации показано, что при внешних провалах напряжения СТК снижает уровень отклонения напряжения сети за счет регуляторов напряжения, а при включении фильтров гармоник данная возможность отсутствует.

7. Возможна ли реализация предлагаемой системы управления активного выпрямителя силами технических специалистов промышленного предприятия или требуется взаимодействие с производителем преобразовательной техники?

В отзыве официального оппонента Шевырёва Ю.В.:

1. Необходимо было дать хотя бы краткий анализ влияния высших гармоник напряжения сети на устойчивость.

2. Непонятно утверждение, что для устойчивой работы АВ необходимо, чтобы напряжение на входе АВ и напряжение сети были равны с учетом величины падения напряжения на индуктивности (стр. 120)? Если учитывать величины падения напряжения на индуктивности, то эти напряжения всегда будут равны.

3. На рис. 5.10 приведена структурная схема усовершенствованной СУ АВ со стабилизирующим эффектом при возмущениях напряжения сети. На данной структурной схеме производится сравнение напряжения сети и напряжения на входе АВ. Рассматривался ли вариант другой вариант реализации структурной схемы усовершенствованной СУ АВ с использованием сравнения напряжения

сети с заданным значением напряжения и подачей результата сравнения на регулятор напряжения?

4. Отсутствует методика расчёта регуляторов активного и реактивного токов обратной последовательности.

5. На структурной схеме СУ АВ с контуром регулирования токов обратной последовательности (рис. 5.5) после преобразования сигналы напряжения заданной прямой и обратной последовательности в системе координат $\alpha\beta$ попарно суммируются и поступают в блок вычисления коэффициента модуляции m и угла сдвига δ . Отсутствует объяснение, почему именно сумма, а не какое то другое сочетание сигналов.

В ходе заседания диссертационного совета:

1. Какой сигнал использовался в качестве обратной связи при моделировании электрической дуги?

2. Задержка по времени равная 5 мс при расчете токов прямой и обратной последовательности, почему взяли именно 5 мс?

3. Разработанная усовершенствованная система управления активным выпрямителем внедрена в действующее производство?

4. Какова количественная оценка провалов напряжения, чем обусловлены исследования при провале напряжения глубиной 50%?

5. Как формируется сигнал задания по реактивной составляющей прямой последовательности?

6. Каково соотношение мощностей ДСП и электроприводов стана горячей прокатки 1750?

7. Проводились ли исследования влияния электроприводов стана на работу ДСП?

8. Критерии устойчивости работы ПЧ-АВ оговорены заводом изготовителем преобразователя частоты?

9. Какова частота ШИМ, которой осуществляется управление силовыми ключами АВ?

10.Предложенная усовершенствованная система управления АВ, в ней предполагается изменение только алгоритма работы или изменение аппаратной части тоже необходимо выполнить?

11.Каким образом производилась оценка устойчивости разработанной усовершенствованной системы управления АВ?

12.В научной новизне указано, что получены результаты исследований, доказывающие возможность параллельной работы электроприводов на базе ПЧ-АВ и ДСП. Что раньше таких исследований не проводилось?

13.Как была построена технология моделирования исследований возможности параллельной работы ДСП и ПЧ-АВ. На принципах цифрового двойника?

Соискатель Денисевич А.С. ответил на заданные ему в ходе заседания вопросы и привёл собственную аргументацию:

1.При проведении экспериментальных исследований были получены массивы мгновенных значений токов электрической дуги и ступеней РПН печного трансформатора и реактора, которые использовались как исходные данные для расчета сигналов управления источников ЭДС, которыми моделировалась электрическая дуга. Мгновенные значения токов были преобразованы в действующие значения.

2. Был проведен литературный обзор по методам выделения прямой и обратной последовательностям. В литературе описаны два способа путем установки фильтра, либо использования задержки по времени равной $\frac{1}{4}$ периода питающего напряжения. Мной были проведены сравнения двух способов, в ходе которого способ с задержкой по времени равной $\frac{1}{4}$ периода питающего напряжения показал лучший результат, так как использование дополнительного фильтра замедляет работу системы управления.

3.Результаты диссертационной работы по разработке системы управления АВ со стабилизирующим эффектом при отклонениях напряжения переданы представителям металлургического завода «ММК Metalurji», которые в свою очередь передали их заводу изготовителю преобразователей частоты компании

АВВ, для программной реализации и перенастройки системы управления активным выпрямителем.

4. По статистическим данным, полученным с подстанции завода, были определены наиболее часто встречающиеся провалы напряжения. Наиболее худшими из них являются однофазные провалы напряжения глубиной 50%. Среднее количество провалов, возникающих в питающей сети составляет 52 шт в год.

5. Сигнал задания по реактивной составляющей прямой последовательности формируется во внешнем контуре регулирования сетевого тока по реактивной составляющей прямой последовательности, путем сравнения напряжения сети и напряжения на входе АВ. Сигнал рассогласования которых обрабатывается пропорционально-интегральным регулятором, на выходе которого получаем ток задания по реактивной составляющей тока прямой последовательности.

6. Мощность печного трансформатора ДСП составляет 300 МВА, а суммарная мощность электроприводов стана горячей прокатки 60 МВт, т.е. мощность ДСП в 5 раз превышает суммарную мощность электроприводов прокатного стана.

7. Исследования влияния электроприводов на базе ПЧ-АВ на работу ДСП в диссертационной работе не проводились. Так как ДСП менее прихотливый электроприемник и ее эффективная работа зависит от уровня напряжения в точке подключения. Таким образом, электроприводы прокатного стана не просадят напряжения на секции шин 34,5 кВ, чтобы снизилась производительность печи.

8. Критериями устойчивости работы ПЧ-АВ являются уставки защиты преобразователя частоты, такие как: защита по максимальному и минимальному уровню напряжения в звене постоянного тока; по максимальному размаху колебаний напряжения в звене постоянного тока; защита по максимальному току, потребляемому АВ, защита по скорости нарастания тока.

9. Управление ключами АВ осуществляется с применением ШИМ с удалением выделенных гармоник. С 5-ю переключениями за четверть периода, т.е. 250 Гц. Удаляются наиболее значимые гармоники 11, 13, 23 и 25, так применяют-

ся 12-ти пульсная схема выпрямления. Таким образом, значимые гармоники, которые присутствуют это 35 и 37.

10. Для реализации предложенной системы управления АВ необходимо изменение только алгоритмов управления, так как в контроллере преобразователя частоты присутствуют необходимые свободные блоки для ее реализации.

11. Для проведения оценки устойчивости разработанной усовершенствованной системы управления АВ, моделировали провалы напряжения, которые были взяты из статистических данных по провалам напряжения. Оценивали переходные процессы токов, потребляемых АВ и напряжения в звене постоянного тока.

12. При проведении литературного обзора не было обнаружено трудов, посвященных исследованию возможности параллельной работы ДСП и электроприводов на базе ПЧ-АВ.

13. Разработана имитационная модель комплекса «ДСП-СТК-ПЧ-АВ», в которой ДСП была представлена с помощью двух встречно включенных управляемых источников ЭДС. Сигналы управления которыми рассчитывались на основе массивов мгновенных значений токов электрической дуги и ступеней РПН печного трансформатора и реактора, полученных при проведении экспериментальных исследований. Нельзя сказать, что при моделировании использовался цифровой двойник.

Диссертационный совет установил, что диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, полностью соответствующую критериям «Положения о присуждении ученых степеней» №842 от 24.09.2013 г. (в редакции от 25.01.2024г.), предъявляемым к кандидатским диссертациям.

На заседании 20 декабря 2024 г. диссертационный совет принял решение за разработку научно обоснованных технических решений, направленных на повышение устойчивости электроприводов прокатного стана при параллельной работе с дуговой сталеплавильной печью за счет разработанной усовершенствованной системы управления силовыми ключами АВ с дополнительным контуром регулирования ортогональных составляющих токов обратной последовательности и внешним контуром регулирования сетевого тока реактивной состав-

ляющей прямой последовательности, присудить Денисевичу Александру Сергеевичу учёную степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 10 человек, из них – 9 докторов наук по специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы, участвовавших в заседании, из 14 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за присуждение ученой степени – 10, против присуждения ученой степени – нет, не проголосовали – нет.

Председательствующий



Handwritten signature of Vadim Rikhatovich Khramshin

Храмшин Вадим Рифхатович

Ученый секретарь
диссертационного совета

Handwritten signature of Konstantin Eduardovich Odintsov

Одинцов Константин Эдуардович

20 декабря 2024 г.