

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 15.03.2024 №3

О присуждении Афанасьеву Максиму Юрьевичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Обеспечение электромагнитной совместимости мощных электроприводов с активными выпрямителями за счет применения специализированных пассивных фильтров» по специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы принята к защите 28 декабря 2023 г. (протокол № 7) 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 Афанасьев Максим Юрьевич, 22 февраля 1993 года рождения. В 2016 году соискатель окончил магистратуру в ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» по направлению 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника. В 2020 году соискатель окончил обучение в аспирантуре ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» по направлению подготовки 13.06.01 Электро- и теплотехника.

Работает в должности исполняющего обязанности заведующего группой электротехнического отдела №2 в акционерном обществе «Магнитогорский институт по проектированию металлургических заводов».

Диссертация «Обеспечение электромагнитной совместимости мощных электроприводов с активными выпрямителями за счет применения специализированных пассивных фильтров» 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. Сычев Юрий Анатольевич – доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», профессор кафедры электроэнергетики и электромеханики;

2. Севостьянов Александр Александрович – кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», заведующий кафедрой электроэнергетики, электроснабжения и силовой электроники.

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация - ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, в своем положительном отзыве, подписанным Кутеповым Антоном Григорьевичем, кандидатом технических наук, доцентом, и.о. заведующего кафедрой «Энергетика и энергоэффективность горной промышленности» и Шевырёвым Юрием Вадимовичем, доктором технических наук, доцентом, профессором кафедры «Энергетика и энергоэффективность горной промышленности», указала, что диссертация Афанасьева Максима Юрьевича «Обеспечение электромагнитной совместимости мощных электроприводов с активными выпрямителями за счет применения специализированных пас-

сивных фильтров» 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, представляет собой решение актуальной задачи по обеспечению электромагнитной совместимости (ЭМС) мощных электроприводов на базе преобразователей частоты с активными выпрямителями (ПЧ-АВ) в системах внутриводского электроснабжения за счет применения специализированных пассивных фильтров, а её автор, Афанасьев Максим Юрьевич, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы.

Соискатель имеет 23 опубликованные работы, в том числе по теме диссертации опубликовано 14 работ, из них: 3 в журналах из перечня рецензируемых научных изданий, рекомендованного ВАК, 5 публикаций, входящих в систему цитирования Scopus, 2 публикации в изданиях, индексируемых РИНЦ, по теме диссертации получено 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ, опубликована 1 научная монография. Общий объем публикаций составляет 18,5 печатных листов. Сведения об опубликованных работах достоверны.

Авторский вклад соискателя заключается в: разработке нового способа обеспечения ЭМС мощных ПЧ-АВ в условиях наличия резонансов тока в частотной характеристике питающей сети 10 кВ за счет сдвига резонансной частоты в безопасную область, где отсутствуют значимые гармоники силовых преобразователей, путем применения специализированного пассивного фильтра (СПФ); экспериментальном анализе частотных характеристик сети 10 кВ АО «Металлургический завод Балаково» и проведении оценки влияния резонансных явлений на качество электроэнергии в сети 10 кВ с мощными электроприводами на базе ПЧ-АВ; разработке усовершенствованной имитационной модели распределительной сети 10 кВ системы электроснабжения металлургического завода с электроприводами сортового стана на базе ПЧ-АВ, которая позволяет выполнять анализ режимов работы СПФ и оценивать эффективность его работы с точки зрения влияния на качество напряжения питающей сети; разработке методики выбора параметров СПФ, учитывающей резонансные явления в питающей сети и позволяющей опре-

делить оптимальные параметры СПФ, обеспечивающие наилучшее качество напряжения в точке общего присоединения; экспериментальных исследованиях показателей качества электроэнергии во внутривозводской распределительной сети 10 кВ АО «Металлургический завод Балаково» с мощными электроприводами на базе ПЧ-АВ и внедренных в эксплуатацию СПФ, доказывающих эффективность разработанного способа обеспечения ЭМС ПЧ-АВ с питающей сетью с точки зрения снижения величины суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения на шинах секций заводской главной понизительной подстанции (ГПП).

Наиболее значимые работы по теме диссертации:

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

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

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

На диссертацию и автореферат поступило 7 отзывов, все положительные:

1. 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 на рис. 6 приведена блок-схема имитационной мо-

дели системы электроснабжения электроприемников 10 кВ, но при этом не показана реализация модели в программной среде Matlab-Simulink. 2) Из текста автореферата не ясно как рассчитывается добротность специализированного пассивного фильтра. 3) На однолинейной схеме электроснабжения АО «Металлургический завод Балаково» (рис. 2) показано большое количество устройств компенсации реактивной мощности (УКРМ) классического типа, подключенных к секциям цеховых распределительных подстанций (РП-1, РП-2, РП-3, РП-5 и др.). Оценивалось ли влияние данных УКРМ на форму частотной характеристики сети 10 кВ и расположение основного резонанса тока? Оказывают ли данные УКРМ дополнительный фильтрующий эффект для гармоник сетевого тока мощных ПЧ-АВ ТМЕИС в составе электроприводов скоростных проволочных блоков сортового стана?

2. Отзыв ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа (д.т.н., профессор Р.Р. Саттаров): 1) Какое количество П-секций использовалось при моделировании кабельных линий внутризаводской распределительной сети? Если в модели кабельной линии используется одинарная П-секция, то достаточно ли точно воспроизводятся частотные характеристики питающей сети? 2) Какое влияние оказывает изменение режимов электроснабжения электроприводов сортового стана на базе ПЧ-АВ на эффективность работы СПФ? Будет ли СПФ обладать достаточной эффективностью при изменении суммарной емкости кабельных линий относительно общих секций заводской ГПП, например, на 50% при переходе на один из возможных резервных режимов электроснабжения? 3) В автореферате сказано, что СПФ реализован на базе конденсаторов с диэлектриком из полипропиленовой пленки. Рассматривался ли в работе вариант исполнения СПФ с применением конденсаторных батарей другого типа, имеющих более высокий коэффициент перегрузки по току высших гармоник?

3. Отзыв ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», г. Уфа (д.т.н., профессор Ф.А. Гизатуллин): 1) Почему в действующих электроприводах скоростных проволочных блоков на базе ПЧ-АВ ТМЕИС большой мощности (2×2500 кВт и 1×6500 кВт) используется шестипульсная схема с примене-

нием двухобмоточного понизительного трансформатора и одного комплекта трехуровневого ПЧ-АВ? Рассматривалась ли в работе возможность изменения схемы питания ПЧ-АВ ТМЕС на двенадцатипульсную, которая позволила бы исключить отдельные значимые гармоники в сетевом токе преобразователя и, тем самым, улучшить качество напряжения в системе внутризаводского электроснабжения? 2) На стр.16 автореферата сказано, что для обеспечения ЭМС ПЧ-АВ ТМЕС в условиях действующего производства на АО «Металлургический завод Балаково» были установлены два СПФ суммарной мощностью 1500 кВА? Почему было принято решение использовать два СПФ по 750 кВАр вместо одного фильтра с номинальной мощностью 1500 кВАр? 3) В автореферате отсутствует подробная схема имитационной модели системы электроснабжения АО «Металлургический завод Балаково» и модели электроприводов на базе ПЧ-АВ.

4. ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», г. Самара (д.т.н., доцент А.А. Базаров): 1) На странице 3 сказано, что использование одночастотных фильтров высших гармоник не обеспечивает заданного качества напряжения из-за широкого диапазона гармоник преобразователей частоты с активными выпрямителями. Возникает вопрос: на предприятии вообще не используются средства для ограничения токов высших гармоник в заводской сети? 2) На странице 8 сказано, что одним из способов борьбы с резонансными явлениями в системах электроснабжения среднего напряжения являются усовершенствованные алгоритмы широтно-импульсной модуляции с возможностью адаптации к форме частотной характеристике сети. Неясно, насколько это возможно, если частота коммутаций определяется параметрами цепей активного выпрямителя. 3) На странице 13 сказано, что на основании результатов моделирования осуществляется выбор оптимального сочетания параметров специализированного пассивного фильтра. Далее не раскрывается алгоритм поиска оптимального решения.

5. ФГБОУ «Кубанский государственный аграрный университет», г. Краснодар (д.т.н., профессор В.В. Тропин): 1) Можно отметить замечание: на стр. 11 указывается «ортогональная составляющая сетевого тока I_d в контуре ре-

гулирования системы управления имитационной модели АВ» по схеме рис. 6, но её влияние на регулирование из схемы не понятно.

6. ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск (д.т.н., доцент М.М. Дудкин): 1) При какой критической величине амплитуды резонанса тока в частотной характеристике питающей сети необходимо использовать специализированные пассивные фильтры для снижения суммарного коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения K_U на общих секциях главной понизительной подстанции предприятия? 2) В автореферате сказано, что при реализации имитационной модели электроприводов с активными выпрямителями Toshiba – Mitsubishi 2×2,5 МВт и 1×6,3 МВт использовались реальные настройки ШИМ с фиксированными углами переключения силовых ключей (алгоритм Fixed Pattern Control PWM), при этом сказано, что значения углов переключения получены на основе экспериментальных данных. Не совсем понятно, как на основе анализа формы мгновенного значения напряжения 3,3 кВ на входе АВ можно восстановить фактические углы переключения для IEGT-транзисторов, используемых в АВ. 3) В автореферате на рис. 8 отмечен граничный уровень коэффициента $K_U = 5\%$, при котором достигается устойчивая параллельная работа мощных электроприводов с активными выпрямителями и чувствительных электроприемников. Чем обосновано данное граничное значение K_U и до какой гармоники ведется расчет этого коэффициента: до 40-ой, как в ГОСТ 32144-2013 или до 150-ой, как при проведении экспериментальных и теоретических исследований?

7. Отзыв ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» г. Магнитогорск (к.т.н., Шубин А.Г., к.т.н., Юдин А.Ю.): 1) В автореферате сказано, что проблема наложения резонанса тока в частотной характеристике питающей сети на диапазон высокочастотных гармоник ПЧ-АВ возникает, как правило, на компактных промышленных предприятиях, где имеется одна ГПП с распределительной сетью среднего напряжения 6-35 кВ с большой длиной кабельных линий. Возможно ли появление опасных резонансов тока в сетях крупных предприятий, где присутствуют несколько ГПП для различных групп цехов? 2) Какую катего-

рию размещения имеет СПФ, изготовленный для системы электроснабжения АО «Металлургический завод Балаково»? 3) Какое влияние на уровень напряжения питающей сети оказывает СПФ? Не возникает ли эффект чрезмерного повышения напряжения сети 10 кВ из-за генерирования реактивной мощности СПФ при работе электроприводов клетей сортового стана на холостом ходу?

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их научными достижениями в области изучения электромагнитной совместимости преобразовательной техники, направленными на улучшение режимов работы и снижение их влияния на качество электрической энергии, в том числе за счет применения фильтрокомпенсирующих устройств. Доцент, д-р техн. наук Ю.А. Сычев является признанным специалистом в области применения многофункциональных фильтрокомпенсирующих устройств в системах электроснабжения, имеющих резонансные режимы при работе нелинейной нагрузки. Доцент, канд. техн. наук А.А. Севостьянов – специалист в области автоматизированного электропривода и в вопросах повышения качества электроэнергии в распределительных сетях низкого и среднего напряжения при работе полупроводниковых преобразователей.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработаны: новый способ обеспечения ЭМС мощных электроприводов ПЧ-АВ с внутриводской питающей сетью среднего напряжения за счет применения СПФ; новая методика расчета параметров СПФ, учитывающая резонансные явления в питающей сети и позволяющая определить оптимальные параметры СПФ; усовершенствованная имитационная модель распределительной сети 10 кВ системы электроснабжения металлургического завода с электроприводами сортового прокатного стана на базе ПЧ-АВ для выбора параметров, исследования режимов работы и оценки эффективности СПФ;

предложены оригинальные научно-обоснованные технические решения по обеспечению электромагнитной совместимости мощных электроприводов с ПЧ-

АВ в сетях с резонансными явлениями за счет применения СПФ, способных сдвигать частоту резонанса тока в питающей сети;

доказана эффективность предложенного способа обеспечения ЭМС мощных электроприводов на базе ПЧ-АВ с питающей сетью;

введены рекомендации по улучшению гармонического состава напряжения во внутризаводской распределительной сети с мощными электроприводами с ПЧ-АВ, предусматривающие коррекцию частотной характеристики питающей сети для исключения наложения области резонанса тока на диапазон высокочастотных гармоник сетевого тока ПЧ-АВ.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказана возможность повышения качества электроэнергии в системах внутризаводского электроснабжения за счет коррекции частотной характеристики питающей сети путем применения СПФ с целью исключения наложения области резонанса тока на диапазон высокочастотных гармоник ПЧ-АВ;

применительно к проблематике диссертации эффективно использованы методы имитационного моделирования и экспериментальных исследований, выполненных в условиях действующего производства на АО «Металлургический завод Балаково»;

изложена идея обеспечения заданного качества электроэнергии за счет применения фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ) нового типа – СПФ на базе одночастотного фильтра с отличными от традиционных фильтров характеристиками: 1) высокой добротностью; 2) применением конденсаторов специального типа с высоким коэффициентом перегрузки по току высших гармоник; 3) применением воздушных реакторов с малой индуктивностью; 4) частотой настройки, соответствующей частоте основного резонанса тока в частотной характеристике питающей сети;

раскрыты причины возникновения во внутризаводских сетях среднего напряжения сильных гармонических искажений напряжения при работе мощных ПЧ-АВ;

изучено влияние мощных ПЧ-АВ и СПФ на показатели качества напряжения при резонансных явлениях во внутризаводских электрических сетях.

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

разработаны и внедрены: специализированные пассивные фильтры, обеспечивающие требуемое качество напряжения во внутривозводской распределительной сети, обеспечивающие устойчивую работу чувствительных электроприемников;

определены: перспективы применения СПФ на компактных металлургических предприятиях в прокатных и электросталеплавильных комплексах. В случае исследуемого завода АО «Металлургический завод Балаково» внедрение двух СПФ 2×750 кВАр позволило достичь снижения средней величины суммарного коэффициента гармонических показателей K_U на секциях заводской ГПП на 70,1-74,6% (уменьшение в 3,3 – 3,8 раза до уровня $K_U \leq 3\%$), что позволило исключить возникновение аварийных отключений и выходы из строя чувствительных заводских электроприемников;

создана новая методика расчета параметров СПФ, учитывающая резонансные явления в питающей сети и позволяющая определить оптимальные параметры СПФ (номинальную мощность, значения индуктивных и емкостных элементов, частоту настройки) с учетом ограничений по уровню гармоник тока конденсаторов и амплитуды броска тока при включении СПФ;

представлены: рекомендации по расчету параметров СПФ, учитывающие возможные резонансные явления в питающей распределительной сети.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

корректность применения математического аппарата; теоретические исследования выполнены с использованием реальных технических характеристик силового электрооборудования ПЧ-АВ электроприводов прокатных станков и системы внутривозводского электроснабжения при правомерных исходных положениях и обоснованных допущениях;

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

идея базируется на использовании СПФ в системах внутриводского электроснабжения металлургических предприятий, позволяющих минимизировать влияние высокочастотных гармоник тока АВ;

выполнено сравнение результатов исследований, полученных автором, с результатами, представленными в патентных и литературных источниках, посвященных вопросам электромагнитной совместимости ПЧ-АВ и применения ФКУ различного типа;

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

использованы современные методы имитационного моделирования с применением математического пакета Matlab.

Личный вклад соискателя состоит в: постановке целей и задач исследования; разработке нового способа обеспечения ЭМС мощных ПЧ-АВ в условиях наличия резонансов тока в питающей сети 10 кВ за счет сдвига резонансной частоты в безопасную область, где отсутствуют значимые гармоники силовых преобразователей, путем применения СПФ; разработке комплексной имитационной модели распределительной сети 10 кВ системы электроснабжения металлургического завода с электроприводами сортового стана на базе ПЧ-АВ, которая позволяет выполнять анализ режимов работы СПФ и оценивать эффективность его работы с точки зрения влияния на качество напряжения питающей сети; разработке методики выбора параметров СПФ, учитывающей резонансные явления в питающей сети и позволяющей определить оптимальные параметры СПФ, обеспечивающие наилучшее качество напряжения в точке общего присоединения.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания:

В отзыве ведущей организации:

1. В работе рассмотрен случай улучшения ЭМС мощных электроприводов на базе ПЧ-АВ с питающей сетью за счет смещения единственного резонанса тока в частотной характеристике сети при помощи СПФ. Будет ли достигнут необходимый технический эффект по снижению суммарного коэффициента искажений си-

нусоидальности кривой напряжения K_U на общих секциях заводской ГПП за счет использования СПФ при наличии в частотной характеристике сети множественных резонансов тока?

2. Применение конденсаторов в составе пассивного фильтра может привести к превышению напряжения в системе электроснабжения выше допустимого значения.

3. В главе 5 диссертации показано, что использовании СПФ происходит смещение основного резонанса токов в частотной характеристике сети 10 кВ в низкочастотную область. Несмотря на значительное уменьшение суммарного коэффициента K_U на секциях ЗРУ-10 кВ заводской ГПП, смещение резонанса вызывает усиление амплитуд гармоник напряжения в низкочастотной области 550-650 Гц (гармоники с $n = 11$ и 13). Возможно ли совместное использование СПФ с обычными одночастотными фильтрами высших гармоник, настроенными на классические низкочастотные гармоники, генерируемые силовыми преобразователями? Будет ли в этом случае достигаться больший технический эффект по снижению коэффициента K_U ?

4. Из работы не понятно, почему использование встроенных в преобразователь частоты с активным выпрямителем L-C-L фильтров, устанавливаемых на входе активного выпрямителя, рекомендуется, как правило, для преобразователей средней мощности (до 1,5 МВА) и напряжением до 1000 В.

5. В чём отличие специализированного пассивного фильтра от обычного пассивного фильтра с точки зрения выполняемых функций?

6. В главе 4 при разработке методики выбора параметров СПФ в качестве основного ограничивающего фактора при определении оптимальной мощности специализированного фильтра задан максимальный уровень суммарного коэффициента синусоидальности кривой тока конденсаторов $K_I = 45\%$. Возможно ли функционирование конденсаторов в составе СПФ с большим значением K_I ? Это позволило бы снизить номинальную мощность СПФ при сохранении технического эффекта по снижению коэффициента K_U на общих секциях ЗРУ-10 кВ заводской ГПП.

В отзыве официального оппонента Сычева Ю.А.:

1. Как обеспечивается сохранение технического эффекта в уменьшении суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения K_U на общих секциях ГПП за счет применения СПФ при возможном изменении режима электроснабжения электроприводов прокатного стана на базе ПЧ-АВ и других заводских электроприемников?

2. В главах 3 и 4 диссертации при проверке адекватности разработанной имитационной модели, а также при дальнейшем анализе эффективности применения СПФ, амплитуды гармоник сетевого тока ПЧ-АВ ТМЕИС 1-3 имеют одинаковые амплитуды в амперах и не зависят от режима работы электроприводов клетей скоростных проволочных блоков (режим холостого хода и режим работы под нагрузкой), что объясняется применением в ПЧ-АВ ТМЕИС специализированного алгоритма ШИМ АВ с фиксированными углами переключения ключей, разработанного компанией TOSHIBA-MITSUBISHI. Как изменится эффективность применения СПФ при использовании ПЧ-АВ с другими алгоритмами ШИМ АВ, например, ШИМ с удалением или подавлением выделенных гармоник, в которых амплитуды высокочастотных гармоник сетевого тока ПЧ-АВ зависят от изменения режима работы электропривода?

3. В работе приводится частотная характеристика сети 10 кВ с резонансом токов в районе 64-ой гармоники. Возможно ли наличие значимых резонансов в частотной характеристике в более высокочастотной области, например, в области частот более 10 кГц, и какое влияние они могут оказать на режимы работы чувствительных электроприемников, работающих параллельно с мощными электроприводами на базе ПЧ-АВ? Как бороться с данными высокочастотными резонансами? Какую конфигурацию в данном случае должен иметь СПФ?

4. В главе 4 согласно графикам на рис. 4.9 СПФ с номинальной мощностью 500 кВАр также имеет высокую эффективность по снижению коэффициента K_U с 10,74% до 2,95%, что и СПФ 1500 кВАр, обеспечивающий снижение K_U до уровня 2,14%. Насколько оправданы затраты по увеличению мощности СПФ в 3 раза? Почему не использовался СПФ мощностью 500 кВАр?

5. Из материалов диссертационной работы не ясно, почему при анализе гармонического состава токов и напряжений сети 10 кВ при работе мощных ПЧ-АВ анализировались гармоники с максимальным номером $n = 150$? Является ли целесообразным увеличение максимального номера анализируемой гармоники, например, до $n = 300$ или 500?

В отзыве официального оппонента Севостьянова А.А.:

1. В первой главе диссертации выполнен подробный анализ существующих способов улучшения качества напряжения внутризаводских распределительных сетей 6-35 кВ с мощными электроприводами на базе ПЧ-АВ, в рамках которого были рассмотрены известные адаптивные алгоритмы ШИМ для АВ с удалением или ослаблением выделенных гармоник, а также использование усовершенствованных систем управления АВ с динамическим выбором таблиц углов переключения ключей, в том числе по методикам Маклакова А.С., Тао Д., Буланова М.В. и Гилемова И.Г. Рассматривались ли эти известные способы обеспечения ЭМС ПЧ-АВ для решения проблемы ухудшения качества электроэнергии в системе внутризаводского электроснабжения АО «Металлургический завод Балаково»?

2. Возможно ли применение СПФ с добротностью Q более, чем 1500 – 2000 о.е., с целью снижения номинальной мощности фильтра при сохранении необходимого эффекта по уменьшению суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения в электрической сети с ПЧ-АВ? Какие технические мероприятия необходимы для реализации СПФ с подобными характеристиками?

3. Как в третьей главе диссертации при реализации имитационной модели электроприводов скоростных проволочных блоков на базе ПЧ-АВ учитывались режимы работы электроприводов: холостой ход, работа при номинальной нагрузке, динамические режимы разгона и торможения? Оказывают ли влияние изменение режимов работы электроприводов на уровне гармонических составляющих в напряжении сети 10 кВ при текущих алгоритмах ШИМ АВ? Какого данное влияние при использовании других алгоритмов ШИМ для АВ, например, ШИМ с удалением или ослаблением выделенных гармоник?

4. В четвертой главе диссертации в качестве одного из положений методики выбора оптимальных параметров СПФ используется проверка СПФ на возникновение недопустимых бросков тока и перенапряжении при включении фильтра. Чем ограничена максимальная кратность тока при включении СПФ? Какие дополнительные технические решения могут быть использованы для ограничения бросков тока?

5. В первой главе диссертации рассматриваются известные типы ФКУ со сложной силовой схемой, которые в некоторых случаях также могут эффективно применяться для борьбы с влиянием резонансов тока в электрических сетях с ПЧ-АВ. Проводился ли сравнительный анализ эффекта по снижению суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения на секциях 10 кВ заводской ГПП АО «Металлургический завод Балаково» при использовании СПФ и известных типов ФКУ, имеющих сложную силовую схему?

В ходе заседания диссертационного совета:

1. В научной новизне упоминаются мощные электроприводы. Начиная с какой мощности вы относите электроприводы к мощным?

2. В схему электроснабжения добавлен пассивный фильтр — дополнительный элемент, в котором также будут происходить потери. Оценивалась ли величина потери энергии с учетом данного элемента?

3. Как была построена частотная характеристика питающей сети.

4. В работе описывается один объект — АО «Металлургический завод Балаково». Где в литературе встречались подобные проблемы, и насколько исследования, которые были проведены, можно напрямую перенести на другие заводы? Что поменяется в ваших исследованиях? Или придется заново оценивать гармонический состав, сдвигать его к определенной частоте? Как быть, если там несколько подключается источников и в сети присутствует множественный резонанс?

Соискатель Афанасьев М.Ю. ответил на заданные ему в ходе заседания вопросы и привёл собственную аргументацию:

В работе в качестве «мощных» приняты электроприводы с мощностью порядка 2 МВт. Такие приводы уже, как правило, довольно мощные и могут оказы-

вать негативное влияние, если у них есть преобразователь частоты с активным выпрямителем, который может генерировать высокочастотные гармоники, которые могут оказать негативное воздействие на электрическую распределительную сеть.

В данной работе величина потерь не оценивалась. Оценивался лишь эффект от внедрения данного специализированного пассивного фильтра. Потери будут минимальные, поскольку фактически сопротивление отсутствует. Сопротивление присутствует только в катушке индуктивности, которая состоит из воздушного реактора с обмоткой в виде медного проводника, и по факту всё сопротивление составляет порядка 0,00085 Ом. Соответственно, с минимальным сопротивлением — минимальные потери.

В диссертационной работе в ходе проведения экспериментальных исследований были получены осциллограммы линейного напряжения со значимыми номерами гармоник и их амплитудой в зависимости от основной частоты. Также получены значения тока преобразователя частоты ТМЕИС с амплитудами значимых гармоник. В точке общего подключения на секциях ГПП рассчитываются значения импеданса сети для заданных номеров высших гармоник как отношение напряжения к току. Затем данные значения сводятся в таблицу, и по ним в программе Excel был построен график частотной характеристики.

Исследования проводились на Ашинском металлургическом заводе; ММК Metalurji (Турция); ЧерМК ПАО «Северсталь», г. Череповец, где имеется множественный резонанс из-за реакторов, присоединенных к одной общей ГПП. Но, как правило, имеется один основной резонанс, который больше всех влияет на проблемы электромагнитной совместимости. В этом случае воздействие необходимо выполнять только на основной резонанс, даже если в сети присутствует множество других резонансов, что и было сделано в случае с ПАО «Северсталь». Для применения результатов работы на других объектах, нужно заново выполнять исследования на новом металлургическом заводе. Необходимо выяснить все параметры электрической распределительной сети, получить гармонический состав напряжения и тока, смоделировать этот процесс и провести исследование на математической модели с целью коррекции частотного резонанса сети. Но методика

выбора параметров специализированного пассивного фильтра останется такой же, поскольку она универсальна и подойдет под любой случай, где происходят резонансные явления.

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., предъявляемым к кандидатским диссертациям.

На заседании 15 марта 2024 г. диссертационный совет принял решение за разработку научно обоснованных технических решений, направленных на обеспечение электромагнитной совместимости электроприводов на базе ПЧ-АВ в сетях с резонансными явлениями за счет сдвига частоты резонанса тока в частотной характеристике питающей сети в безопасную область при помощи СПФ, разработку методики, позволяющей рассчитать оптимальные параметры СПФ, обеспечивающей наилучшее качество напряжения в точке общего присоединения заводских электроприемников, присудить Афанасьеву Максиму Юрьевичу учёную степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 12 человек, из них – 11 докторов наук по специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы, учувствовавших в заседании, из 14 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за присуждение ученой степени – 12, против присуждения ученой степени – нет, не проголосовали – нет.

Председатель

диссертационного совета



Корнилов Геннадий Петрович

Ученый секретарь

диссертационного совета

Одинцов Константин Эдуардович

15 марта 2024 г.