

## ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук, доцента  
Сычева Юрия Анатольевича на диссертационную работу  
Афанасьева Максима Юрьевича «**Обеспечение электромагнитной  
совместимости мощных электроприводов с активными выпрямителями  
за счет применения специализированных пассивных фильтров**»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по  
научной специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

### Актуальность темы диссертации

Диссертация Афанасьева Максима Юрьевича посвящена решению важной научной задачи обеспечения электромагнитной совместимости мощных электроприводов на базе преобразователей частоты с активными выпрямителями (ПЧ-АВ).

Современные промышленные электроприводы большой мощности часто реализуются на базе многоуровневых ПЧ-АВ, питающих приводные синхронные или асинхронные двигатели. Основными силовыми элементами, на базе которых реализованы силовые схемы активных выпрямителей (АВ) и автономных инверторов напряжения (АИН) в составе ПЧ-АВ, являются полностью управляемые IGBT-тиристоры, IGBT и IEGT-транзисторы. Наиболее характерным примером применения мощных многоуровневых ПЧ-АВ являются главные электроприводы клеток сортовых и листовых прокатных станков, функционирующих на металлургических предприятиях. Применение активных выпрямителей в составе ПЧ-АВ имеет ряд существенных преимуществ по сравнению с традиционными типами силовых преобразователей, построенными на базе полупроводниковых силовых ключей, таких как: 1) возможность поддержания заданного коэффициента мощности на входе ПЧ-АВ, 2) способность обеспечивать рекуперацию энергии в питающую сеть в тормозных режимах работы электропривода, 3) улучшенный гармонический состав сетевого тока из-за использования в системе управления АВ модифицированных алгоритмов широтно-импульсной модуляции (ШИМ) с функцией удаления или ослабления выделенных гармоник тока. Однако опыт промышленной эксплуатации данных типов силовых преобразователей выявил серьезные проблемы с электромагнитной совместимостью (ЭМС) с внутризаводской питающей сетью среднего напряжения 6-35 кВ для тех случаев, когда в частотной характеристике питающей сети присутствуют резонансы токов, совпадающие по своей частоте с высокочастотными гармониками сетевого тока ПЧ-АВ. В этом случае из-за ухудшения качества напряжения на секциях заводской главной понизительной подстанции (ГПП) возникают аварийные отключения и выходы из строя чувствительных

электроприемников (источники бесперебойного питания устройств промышленной автоматизации, батареи статических конденсаторов без защитных реакторов, защитные цепи и блоки синхронизации других силовых преобразователей в составе электроприводов промышленных механизмов).

Использование существующих технических решений по обеспечению ЭМС мощных электроприводов прокатных станов на базе ПЧ-АВ за счет использования модифицированных алгоритмов широтно-импульсной модуляции (ШИМ) АВ с учетом резонансных явлений, а также использование усовершенствованных систем управления АВ, может быть затруднено из-за закрытой структуры систем управления ПЧ-АВ. Также необходимо отметить, что применение известных типов фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ) в виде одночастотных фильтров высших гармоник, настроенных на фильтрацию определенной группы гармоник сетевого тока АВ, часто не обеспечивает достижение заданного качества напряжения на секциях заводской ГПП из-за широкого диапазона высокочастотных гармоник АВ, попадающих в область резонанса тока в частотной характеристике сети. Использование широкополосных фильтров высших гармоник и ФКУ специального типа (конвейерный, двухчастотный и т.д.) в ряде случаев обеспечивает достижение необходимого технического эффекта по улучшению качества напряжения, но устройства данного типа имеют сложную конструкцию, большие массогабаритные показатели и высокую стоимость.

С учетом вышесказанного актуальной задачей является разработка нового способа обеспечения ЭМС мощных электроприводов на базе ПЧ-АВ за счет применения специализированных пассивных фильтров (СПФ), обеспечивающих сдвиг частоты резонанса тока в частотной характеристике сети в безопасную область, где отсутствует наложение высокочастотных гармоник ПЧ-АВ. Данные СПФ представляют собой одночастотные фильтры с высокой добротностью (более 1000), частота настройки которых соответствует максимуму основного резонанса токов в частотной характеристике питающей сети.

### **Объем, структура и содержание диссертации**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и трех приложений.

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи исследования, показана научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов работы.

**В первой главе** рассмотрены основные источники и причины возникновения резонансов токов в распределительных сетях 6-35 кВ систем внутриводского электроснабжения металлургических заводов с мощными электроприводами с ПЧ-АВ. Описаны существующие способы и рекомендации по обеспе-

чению ЭМС ПЧ-АВ с питающей сетью среднего напряжения.

Проведен анализ существующих конфигураций систем внутриводского электроснабжения (СЭС) различных металлургических предприятий.

**Вторая глава** диссертационной работы посвящена исследованию показателей качества электроэнергии (ПКЭ) в распределительной сети 10 кВ СЭС с мощными электроприводами сортового прокатного стана на базе ПЧ-АВ АО «Металлургический завод Балаково» (г. Балаково, Саратовская область). Проведены исследования причин возникновения резонансных явлений во внутриводской электрической сети металлургического завода.

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

**В четвертой главе** приведено описание нового способа обеспечения ЭМС за счет сдвига частоты резонанса в частотной характеристике сети в безопасную зону, где отсутствует наложение высокочастотных гармоник сетевого тока ПЧ-АВ. Сдвиг частоты резонанса осуществляется за счет применения СПФ, который представляет собой одночастотный фильтр с высокой добротностью (более 1000 о.е.).

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

**В заключении** соискатель приводит основные выводы по совокупности результатов, достигнутых в ходе выполнения диссертационной работы.

**В приложениях** содержатся параметры кабельных линий, суммарные ёмкости кабельных линий, акт использования результатов диссертации на металлургическом предприятии АО «Металлургический завод Балаково».

### **Научная новизна и достоверность полученных результатов**

1. Разработан новый способ обеспечения ЭМС мощных электроприводов с ПЧ-АВ, отличающийся от известных тем, что для улучшения показателей качества электроэнергии во внутриводской распределительной сети среднего напряжения осуществляется сдвиг частоты резонанса тока в частотной характеристике питающей сети в безопасную область, где отсутствует наложение вы-

сокочастотных гармоник ПЧ-АВ, за счет применения СПФ.

2. Разработана новая методика выбора параметров СПФ, отличающаяся от известных тем, что учитывает резонансные явления в питающей сети и позволяет определить оптимальные параметры СПФ, обеспечивающие наилучшее качество напряжения в точке общего присоединения заводских электроприемников.

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

4. Получены результаты экспериментальных исследований ПКЭ в сети 10 кВ с мощными ЭП на базе ПЧ-АВ, доказывающие эффективность предложенных решений по обеспечению ЭМС ПЧ-АВ с питающей сетью за счет использования СПФ.

Достоверность и обоснованность научных положений подтверждается: 1) правоммерностью исходных предпосылок и положений; 2) корректным использованием математических и имитационных методов моделирования на ЭВМ; 3) соответствием полученных в работе результатов и результатов, представленных в научной трудах других авторов по схожей тематике; 4) результатами экспериментальных исследований, полученными на действующем промышленном предприятии АО «Металлургический завод Балаково».

### **Публикации и апробация диссертационной работы**

Теоретические и практические результаты, полученные в ходе диссертационных исследований, опубликованы в 14 печатных работах, из них 3 научные статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 5 научных публикаций в изданиях, входящих в систему цитирования Scopus. Кроме того, соискателем получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ и опубликована научная монография.

### **Заключение о соответствии диссертации установленным критериям**

На основе проведенного анализа предоставленных материалов можно сделать вывод, что диссертационная работа Афанасьева М.Ю. полностью отвечает всем критериям, предъявляемым «Положением о присвоении ученых степеней», утвержденным Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842. В ней соблюдены следующие принципы соответствия:

1. Указанная соискателем цель работы «улучшение ЭМС ПЧ-АВ в составе электроприводов клетей прокатных станов с распределительной сетью среднего напряжения системы внутривзаводского электроснабжения при наличии резонансных гармоник ПЧ-АВ, за счет применения СПФ».

нансных явлений за счет использования СПФ» реализована в рамках представленной диссертации.

2. Автореферат диссертации Афанасьева М.Ю., соответствует диссертационной работе по всем квалификационным признакам: по цели, задачам исследования, основным положениям, определениям актуальности, научной значимости, новизны, практической ценности и т.д.

3. Основные выводы и результаты диссертационной работы соответствуют поставленным задачам исследований и сформулированы соискателем структурно и содержательно.

4. Научные публикации Афанасьева М.Ю., изданные в период с 2017 по 2023 гг., с достаточной полнотой отражают сущность диссертационной работы, а также полученные результаты и выводы.

5. Тема и содержание диссертации Афанасьева М.Ю. соответствует паспорту специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы:

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

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

Диссертационная работа Афанасьева М.Ю. написана доступным языком, корректным в научном и творческом отношениях. Материалы и результаты исследований изложены в полном объеме, достаточным для понимания, четко, доступно и репрезентативно, что позволило автору раскрыть научно-техническую значимость диссертационной работы на необходимом квалификационном уровне.

### **Замечания по диссертационной работе**

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 клеток 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?

Необходимо отметить, что замечания не являются принципиальными и не снижают ценность диссертационной работы.

### **Заключение**

Диссертация Афанасьева Максима Юрьевича является законченной научно-квалификационной работой. В диссертационной работе представлено реше-



ние актуальной задачи по обеспечению электромагнитной совместимости мощных электроприводов на базе преобразователей частоты с активными выпрямителями в системах внутриводского электроснабжения за счет применения специализированных пассивных фильтров. Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы. Диссертация соответствует всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям в соответствии с п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней от 24.09.2013 г. №842, а ее автор, Афанасьев Максим Юрьевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы.

### Официальный оппонент

Профессор кафедры электроэнергетики и электромеханики  
федерального государственного бюджетного образовательного  
учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный  
университет императрицы Екатерины II»,  
доктор технических наук, доцент



Сычев Юрий Анатольевич

26.02.2024 г.



Подпись Ю.А. Сычева  
Заведующий  
начальник управления делопроизводства  
контроля документооборота



Е.Р. Яновицкая  
26 ФЕВ 2024

Адрес: 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д.2  
Официальный сайт: [www.spmi.ru](http://www.spmi.ru)  
Телефон (рабочий): +7 (812) 328-8648  
Адрес электронной почты: [Sychev\\_YuA@pers.spmi.ru](mailto:Sychev_YuA@pers.spmi.ru)