

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе  
ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»  
Д-р экон. наук, проф.

И.П. Савельева

31.08.2023

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет  
(национальный исследовательский университет)»

на диссертационную работу Гилемова Ильдара Галиевича

**«Повышение качества электроэнергии во внутривозовских распределительных сетях за счет усовершенствованных систем управления активных выпрямителей»,**  
представленную к защите в диссертационный совет 24.2.324.05 при  
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.2. – «Электротехнические комплексы и системы»

**Актуальность работы.** В современных электротехнических комплексах металлургических предприятий России и мира большое распространение получили регулируемые электроприводы переменного тока, выполненные на базе преобразователей частоты (ПЧ) с активными выпрямителями (АВ). Такие ПЧ обладают рядом преимуществ, которые позволили им вытеснить традиционные ПЧ с неуправляемыми выпрямителями, такими как: 1) возможность рекуперации энергии в питающую сеть в тормозных режимах электропривода; 2) возможность поддержания единичного коэффициента мощности на входе ПЧ-АВ; 3) улучшенный гармонический состав сетевого тока по сравнению с диодными и тиристорными выпрямителями в составе ПЧ. Однако опыт эксплуатации электроприводов с мощными ПЧ-АВ показал наличие серьезных проблем электромагнитной совместимости (ЭМС) данных силовых преобразователей с питающей сетью среднего напряжения 6-35 кВ. Данная проблема возникает в тех случаях, когда в частотной характеристике сети имеет место резонанс токов, совпадающий по частотному диапазону с высокочастотными гармониками в сетевом токе ПЧ-АВ. В этом случае на общих секциях заводской главной понизительной подстанции (ГПП) возникают сильные гармонические искажения напряжения, которые могут приводить к нарушению режимов работы, аварийным отключениям, а в некоторых случаях и выходам из строя, чувствительных электроприемников.

Одним из действенных способов борьбы с данными негативными явлениями является использование модифицированных алгоритмов ШИМ АВ с удалением или ослаблением выделенных гармоник тока, которые попадают в диапазон резонанса в частотной характеристике питающей сети. Однако из-за применения в существующих системах управления АВ одной таблицы углов переключения для ШИМ с удалением (ослаблением) выделенных технических эффект от применения данного способа может быть снижен из-за невозможности применения оптимальных углов переключения силовых ключей АВ в различных режимах работы электропривода (холостой ход, работа под нагрузкой, динамические режимы разгона и торможения, резкий наброс и сброс нагрузки). При работе АВ в различных динамических и статических режимах работы, например в составе электроприводов клетей прокатных станов, возможны существенные изменения величин отдельных гармоник. В случае их попадания в резонансные области частотной характеристики питающей сети возможны значительные изменения показателей качества электроэнергии в системе внутривозовского электроснабжения среднего напряжения 6-35 кВ. В соответствии с этим актуальной задачей является разработка и внедрение усовершенствованных систем управления АВ в составе мощных электроприводов промышленных механизмов с циклической нагрузкой, в которых обеспечивается адаптация режима АВ за счет применения

ЗАРЕГИСТРИРОВАНО В ОТДЕЛЕ ДЕЛОПРОИЗВОДСТВА ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»
за № _____
Дата регистрации <u>08.09.2023</u>
Фамилия регистратора _____



нескольких таблиц углов переключения силовых ключей и использования специализированной логики для выбора оптимальной таблицы в зависимости от текущего режима работы электропривода. Применение данных систем управления АВ позволит обеспечить повышение качества электроэнергии во внутривозовских распределительных сетях среднего напряжения и повысить надежность и безаварийность работы чувствительных электроприемников, получающих питание от общих секции заводской ГПП.

**Объем, структура и содержание диссертации.** Рукопись диссертации состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и шести приложений.

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

**В первой главе** проведен анализ схем питания и силовых схем ПЧ-АВ современных главных электроприводов прокатных станов. Рассмотрены применяемые алгоритмы ШИМ и системы управления активных выпрямителей, а также способы их совершенствования с целью улучшения показателей качества электроэнергии.

**Во второй главе** показаны результаты экспериментов по анализу качества электроэнергии в системах электроснабжения ЗАО «ММК Metalurji» (Дертйол, Турция) и ЧерМК ПАО «Северсталь» (Череповец, Россия). Приведена оценка влияния режимов работы главных электроприводов прокатных станов на базе ПЧ-АВ на качество электроэнергии.

**В третьей главе** посвящена описанию разработанной системы управления АВ с динамическим выбором таблиц углов переключения силовых ключей в зависимости от режима работы электропривода. Также в данной главе приведено описание разработанных имитационных моделей внутривозовских распределительных систем электроснабжения и электроприводов прокатных станов на базе ПЧ-АВ для электротехнических комплексов двух заводов для дальнейшей оценки качества электроэнергии при различных режимах работы электроприводов с усовершенствованной системой управления АВ.

**В четвертой главе** соискатель предложил методику расчёта таблиц углов переключения силовых ключей для разработанной системы управления АВ. По данной методике были рассчитаны таблицы углов переключения с увеличенной частотой коммутации силовых ключей для режимов работы электроприводов со сниженной нагрузкой и на холостом ходу.

**В пятой главе** представлены результаты оценки эффективности разработанной системы управления АВ при внедрении на действующем оборудовании электроприводов стана холодной прокатки ЧерМК ПАО «Северсталь» и стана горячей прокатки 1750 ЗАО «ММК Metalurji».

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

**В приложениях** содержатся характеристики исследуемых электроприводов, электротехнических комплексов предприятий, рассчитанные значения различных таблиц углов переключений силовых ключей АВ, акты использования результатов диссертации на металлургических предприятиях.

**Научная новизна и достоверность полученных результатов.** В рамках диссертационной работы соискателем доказана значимость учёта статических и динамических режимов электроприводов с ПЧ-АВ при оценке качества электроэнергии в системе внутривозовского электроснабжения.

Разработана усовершенствованная система управления АВ, которая отличается от известных возможностью смены таблиц углов переключения силовых ключей АВ в зависимости от режима работы электропривода.

Разработана новая методика расчёта таблиц углов переключения силовых ключей для усовершенствованной системы управления АВ. Определены критерии для динамического выбора таблицы углов переключения в зависимости от режима работы электропривода с целью минимизации возмущающих воздействий на регулируемые координаты и с учетом



ограничений по нагреву силовых ключей.

Разработана усовершенствованная имитационная модель системы управления АВ, отличающаяся от известных тем, что позволяет проводить анализ качества электроэнергии в сетях 6-35 кВ при динамическом выборе таблиц углов переключения с учетом различных режимов работы электропривода.

Достоверность и обоснованность научных положений базируется на корректном применении основных законов электротехники, силовой электроники и методов математического моделирования, использовании в качестве исходных данных реальных осциллограмм токов и напряжений, полученных на исследуемых объектах.

**Публикации и апробация диссертационной работы.** Теоретические и практические результаты, полученные в ходе диссертационных исследований, опубликованы в 19 печатных работах, из них 5 научные статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 9 научных публикаций в изданиях, входящих в систему цитирования Scopus. Кроме того, соискателем получено 2 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ и опубликована 1 научная монография.

**Заключение о соответствии диссертации установленным критериям.** На основе проведенного анализа предоставленных материалов можно сделать вывод, что диссертационная работа Гилемова И.Г. 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 электромагнитной совместимости мощных электроприводов промышленных агрегатов, построенных на базе ПЧ-АВ, с внутривзаводской распределительной сетью системы электроснабжения среднего напряжения 6-35 кВ за счет применения усовершенствованной системы управления АВ с динамическим выбором таблиц углов переключения, позволяющей обеспечить наилучшие показатели качества напряжения в точке общего присоединения с учётом всех основных статических и динамических режимов работы электропривода» реализована в рамках представленной диссертации.

2. Автореферат диссертации Гилемова И.Г., 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 Гилемова И.Г., изданные в период с 2018 по 2023 гг., с достаточной полнотой отражают сущность диссертационной работы, а также полученные результаты и выводы.

5. Тема и содержание диссертации Гилемова И.Г. соответствует паспорту специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы:

– по формуле специальности по принципам и средствам управления объектами, определяющими функциональные свойства действующих или создаваемых электротехнических комплексов и систем промышленного, транспортного и бытового назначения (система управления активным выпрямителем, являющаяся функциональной частью системы автоматизированного электропривода, а также система электроснабжения промышленных предприятий).

– объекту исследования: в плане развития общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение систем изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем; в плане разработки, структурного и параметрического синтеза электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработки алгоритмов энергоэффективного управления; в плане исследования



работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях (разработка имитационной модели усовершенствованной системы управления активного выпрямителя, разработка имитационных моделей систем электроснабжения и электроприводов с ПЧ-АВ прокатных станов ЗАО «ММК Metalurji» и ЧерМК ПАО «Северсталь», разработка методики расчета таблиц углов переключения силовых ключей активного выпрямителя с усовершенствованной системой управления).

Диссертационная работа Гилемова И.Г. написана доступным языком, корректным в научном и творческом отношении. 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 и дискуссионные положения по диссертационной работе**

1. В диссертационной работе показан положительный технический эффект при использовании усовершенствованной системы управления АВ в виде снижения суммарного коэффициента гармонических составляющих  $K_U$ . В тоже время величина средняя величина  $K_U$  и величины отдельных гармоник в некоторых из рассмотренных случаях превышают значения, установленные ГОСТ 32144-2013. В работе указано, что использование разработанной системы управления АВ позволяет нормализовать работу чувствительных электроприёмников. Проводился ли анализ статистики отказов электрооборудования до и после внедрения на действующем производстве?

2. В четвертой главе при расчётах дополнительных таблиц углов переключения силовых ключей по методу ШИМ с удалением выделенных гармоник для усовершенствованной системы управления АВ электроприводов стана холодной прокатки ЧерМК ПАО «Северсталь» использовалось условие удаления всех возможных значимых гармоник, попадающих в область основного резонанса частотной характеристики питающей сети. При этом в главе 2 отмечалось наличие множественных резонансов с меньшей амплитудой, но в более высоком частотном диапазоне. В работе не рассмотрена возможность удаления гармоник, попадающих в области дополнительных резонансов частотной характеристики внутриводской сети, а также технический эффект при удалении некоторых из них.

3. В пятой главе при исследовании эффективности усовершенствованной системы управления АВ при её использовании в электроприводах стана холодной прокатки ЧерМК ПАО «Северсталь» были использованы рассчитанные таблицы углов переключения силовых ключей только по методу ШИМ с удалением выделенных гармоник. В тоже время в случае электроприводов стана горячей прокатки 1750 ЗАО «ММК Metalurji» был рассмотрен также вариант с использованием таблиц, рассчитанных по методу ШИМ с подавлением выделенных гармоник. Исследовался ли вариант применения таблиц углов переключения силовых ключей АВ, рассчитанных по методу ШИМ с подавлением выделенных гармоник для электроприводов на базе ПЧ-АВ стана холодной прокатки?

4. 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 сетевого тока, а также регулятора напряжения в звене постоянного тока?

5. В работе не рассмотрены различные аварийные режимы работы ПЧ-АВ с усовершенствованной системой управления АВ, например, при провалах питающего напряжения.

**Заключение по диссертационной работе.** Ведущая организация считает, что диссертация Гилемова Ильдара Галиевича является законченной научно-квалификационной работой, выполненной автором единолично. Приведенные выше дискуссионные положения

могут быть полезны в дальнейшей научно-исследовательской деятельности Гилемова И.Г., а критические замечания не имеют принципиального характера и не снижают ценность работы.

Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 2.4.2 – “Электротехнические комплексы и системы”. В диссертационной работе представлено решение актуальной задачи по обеспечению электромагнитной совместимости мощных электроприводов на базе преобразователей частоты с активными выпрямителями в системах внутривзаводского электроснабжения. 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, Гилемов Ильдар Галиевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.2. – “Электротехнические комплексы и системы”.

Диссертационная работа, автореферат диссертации, отзыв ведущей организации обсуждены и утверждены на заседании кафедры “Электропривод, мехатроника и электромеханика” федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования “Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)”, протокол от 31 августа 2023 №1.

Зам. заведующего кафедрой  
«Электропривод, мехатроника  
и электромеханика», д-р техн. наук, доц.  
ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»

Дудкин Максим Михайлович

31 августа 2023

**Сведения о ведущей организации**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

Россия, 454080 Челябинск, проспект Ленина, 76

Тел./факс: +7 (351) 267-99-00

E-mail: [grigorevma@susu.ru](mailto:grigorevma@susu.ru)

[www.susu.ru](http://www.susu.ru)

**ПОДПИСЬ УДОСТОВЕРЯЮ**



Начальник отдела кадров  
работников  
УНИВЕРСИТЕТА

Старикова Е.А.