

*На правах рукописи*



**ГИЛЕМОВ ИЛЬДАР ГАЛИЕВИЧ**

**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ВО  
ВНУТРИЗАВОДСКИХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ ЗА СЧЕТ  
УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ АКТИВНЫХ  
ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ**

**Специальность 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Магнитогорск - 2023

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

**Научный руководитель:**

**Николаев Александр Аркадьевич**  
кандидат технических наук, доцент

**Официальные оппоненты:**

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

**Шевырёв Юрий Вадимович**

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

**Ведущая организация:**

ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», (г. Челябинск)

Защита состоится «29» сентября 2023 г. в 15 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.324.05 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» по адресу: 455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, ауд. 233.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» и на официальном сайте <http://magtu.ru/>.

Автореферат разослан « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 24.2.324.05  
канд. техн. наук, доцент

Одинцов Константин Эдуардович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования.

Широкое распространение в современных электротехнических комплексах металлургических предприятий России и мира получили регулируемые электроприводы переменного тока на базе преобразователей частоты с активными выпрямителями (ПЧ-АВ). По сравнению с ПЧ с неуправляемыми выпрямителями они обладают рядом значимых преимуществ. Среди них стоит отметить: 1) способность АВ обеспечивать возврат электрической энергии в питающую сеть в генераторных режимах работы электропривода; 2) поддержание коэффициента мощности равным единице в точке присоединения ПЧ к питающей сети; 3) использование специальных алгоритмов широтно-импульсной модуляции (ШИМ), позволяющих улучшить качество напряжения питающей сети за счёт исключения определённых гармоник тока, потребляемого преобразователем. Перечисленные достоинства позволили ПЧ-АВ вытеснить ПЧ с традиционными диодными выпрямителями в электроприводах большой мощности с частыми динамическими режимами и необходимостью рекуперации электроэнергии в питающую сеть предприятия.

Однако ПЧ-АВ не лишены недостатков. Помимо более высокой стоимости и сложной системы управления (СУ) АВ, опыт эксплуатации ПЧ-АВ на металлургических заводах России и мира позволил выявить более существенные недостатки. При наличии сложных резонансных явлений во внутренней распределительной сети предприятия 6 – 35 кВ возможно попадание высокочастотных гармоник тока, генерируемых АВ, в резонансную область частотной характеристики сети. При этом происходит значительное усиление гармоник напряжения с этими же номерами в точке присоединения ПЧ-АВ. Если конфигурация внутризаводской распределительной системы электроснабжения не предусматривает отдельную секцию на главной понизительной подстанции (ГПП) для питания мощных ПЧ-АВ, происходит значительное ухудшение качества напряжения в точке общего присоединения внутризаводских электроприёмников. В результате возможно ухудшение работы или аварийные режимы функционирования чувствительных электроприёмников.

Широкое распространение ПЧ-АВ вызвало необходимость их совершенствования, улучшения электромагнитной совместимости (ЭМС) с питающей сетью. Однако в большинстве исследований, направленных на улучшение технических характеристик ПЧ-АВ учитываются только статические режимы работы электроприводов. Предлагаемые модифицированные алгоритмы ШИМ АВ обеспечивают достижение положительного технического эффекта при рассмотрении только одного или нескольких режимов работы электропривода на значительном интервале времени или наоборот очень узком его отрезке. Электроприводы прокатных станов должны обеспечивать строгое регулирование основных координат при динамических режимах работы прокатного стана. Длительность переходных процессов при этом может составлять от нескольких миллисекунд до нескольких минут. Исследованиями влияния на питающую сеть электроприводов на базе ПЧ-АВ при подобных режимах работы часто пренебрегают.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод об актуальности рассматриваемой в рамках диссертационной работы темы исследования.

Степень разработанности. Результаты теоретических и экспериментальных исследований алгоритмов ШИМ АВ, ЭМС ПЧ-АВ с питающей сетью, систем управления АВ опубликованы в трудах отечественных и зарубежных ученых: А.А. Николаев, А.С. Маклаков, Т. Цзин, М.В. Буланов, Д.С. Крубцов, Р.Т. Шрейнер, И.С. Иоффе, J. Rodriguez, P. Marino, В.К. Bose, J. Pontt, L.G. Franquelo, G. Konstantinou, J. Napolos, D. Boroyevich, Y.

Zhang и других.

Большинство работ в области исследования ЭМС ПЧ-АВ посвящено разработке модифицированных алгоритмов ШИМ, направленных на улучшение определённых показателей качества напряжения. В ряде публикаций исследования проводились в том числе с учётом резонансных явлений в питающей сети. Значительная часть работ выполнена с помощью имитационного моделирования. Реже представлены результаты исследований, полученных на экспериментальных стендах ПЧ-АВ. Внедрение некоторых работ на действующих производствах может быть затруднено из-за закрытого программного кода современных ПЧ-АВ.

Несмотря на значительное количество исследований, посвящённых повышению ЭМС ПЧ-АВ, в отечественной и зарубежной литературе отсутствуют исследования, посвящённые оценке влияния статических и динамических режимов работы электроприводов на базе ПЧ-АВ на качество электроэнергии. В известных исследованиях приводится упрощённая оценка ЭМС, основанная на анализе кратковременных статических участков работы ПЧ-АВ, например, режимы холостого хода и под нагрузкой без учёта переходных процессов. В связи с этим, данный вопрос заслуживает детального рассмотрения в рамках отдельной исследовательской работы.

**Объектом исследования** является электротехнический комплекс «внутризаводская распределительная система электроснабжения – электроприводы производственных агрегатов на базе ПЧ-АВ большой мощности». **Предметом исследования** является система управления активного выпрямителя преобразователя частоты электроприводов промышленных агрегатов.

**Целью диссертационной работы** является улучшение электромагнитной совместимости мощных электроприводов промышленных агрегатов, построенных на базе ПЧ-АВ, с внутризаводской 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.

**Для достижения указанной цели были сформулированы следующие задачи:**

1. Проведение экспериментальных исследований режимов работы мощных электроприводов прокатных станов на базе ПЧ-АВ на действующих металлургических предприятиях и их влияния на качество электроэнергии во внутризаводских распределительных сетях 6-35 кВ. Теоретический и экспериментальный анализ алгоритмов ШИМ и систем управления, применяемых в современных АВ.

2. Разработка усовершенствованных алгоритмов и системы управления АВ с динамическим выбором оптимальной таблицы углов переключения силовых ключей в зависимости от текущего режима работы электропривода с целью улучшения качества напряжения в распределительной сети 6-35 кВ.

3. Разработка усовершенствованной имитационной модели СУ АВ для анализа качества электроэнергии в сетях 6-35 кВ при динамическом выборе таблиц углов переключения с учётом различных режимов работы электропривода.

4. Разработка методики расчёта таблиц углов переключения силовых ключей активного выпрямителя для усовершенствованной системы управления. Определение граничных значений токов для таблиц с различной частотой коммутации с учётом ограничений по нагреву силовых ключей.

5. Проведение теоретических и экспериментальных исследований эффективности усовершенствованной системы управления АВ по улучшению качества электроэнергии во внутризаводских распределительных сетях среднего напряжения 6-35 кВ.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в следующем:

1. Получены новые результаты экспериментальных исследований, показывающие значимость учёта статических и динамических режимов электроприводов на базе ПЧ-АВ при оценке качества электроэнергии в системе внутривзаводского электроснабжения.

2. Разработана усовершенствованная система управления АВ с динамическим выбором оптимальной таблицы углов переключения силовых ключей, отличающаяся от известных тем, что в зависимости от режима работы электропривода система управления выбирает таблицу углов переключения силовых ключей, обеспечивающую максимально возможное для данного режима работы снижение негативного влияния ПЧ-АВ на питающую сеть среднего напряжения.

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

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

**Практическая ценность и реализация работы** состоит в том, что разработанная усовершенствованная СУ АВ с динамическим выбором таблиц углов переключения силовых ключей обеспечивает снижение величины суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения  $K_U$  в точке общего присоединения потребителей электроэнергии во всех статических и динамических режимах работы электроприводов. На примере ЗАО «ММК Metalurji», г. Дёртйол, Турция, положительный технический эффект от внедрения предлагаемой СУ АВ в отношении снижения средней величины коэффициента  $K_U$  в точке общего присоединения электроприёмников составляет 59,7 %. При внедрении усовершенствованной СУ АВ на ПЧ электроприводов стана холодной прокатки ЧерМК ПАО «Северсталь» г. Череповец, Россия, технический эффект составит 67,8 %. Разработанные усовершенствованные алгоритмы, системы управления и методики приняты ко внедрению на указанных металлургических заводах.

**Методика проведения исследований.** Разработка усовершенствованных систем управления АВ производилась с использованием теории автоматического управления, теории электропривода и систем электроснабжения, силовой электроники. Для оценки эффективности усовершенствованной системы управления АВ применялся метод имитационного моделирования в графической среде программирования Simulink пакета прикладных программ для решения задач технических вычислений Matlab. Имитационные модели электротехнических комплексов, имеющих в своём составе мощные электроприводы на базе ПЧ-АВ с предлагаемыми усовершенствованными системами управления, разрабатывались с учётом уже известных методов математического и имитационного моделирования, алгебры логики, дифференциальных уравнений. Теоретические исследования проводились с использованием экспериментальных осциллограмм мгновенных значений напряжений и токов, моментов и мощностей электроприводов стана холодной прокатки ЧерМК ПАО «Северсталь» и стана горячей прокатки ЗАО «ММК Metalurji», полученных с использованием многоканального регистратора РЭС-3 фирмы «Прософт-Системы» и NI-USB-6251 фирмы National Instruments (частота дискретизации 100 кГц при записи мгновенных значений напряжений и 20 кГц – для токов); анализатора качества электроэнергии ELSPEC G4420 (частота дискретизации 100 кГц при записи мгновенных значений напряжений и 20 кГц – для токов); анализатора качества напряжения Fluke 435 с токовыми клещами Fluke i5s (частота

дискретизации до 5 кГц); серверов быстрых архивов ИВА (с периодом дискретизации меньше 1 мс).

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты экспериментальных исследований, показывающие значимость учёта статических и динамических режимов электроприводов на базе ПЧ-АВ при оценке качества электроэнергии в системе внутриводского электроснабжения.

2. Усовершенствованная система управления АВ с динамическим выбором оптимальной таблицы углов переключения силовых ключей, учитывающая режимы работы электропривода на базе ПЧ-АВ.

3. Методика расчёта таблиц углов переключения силовых ключей АВ для предлагаемой системы управления для электроприводов механизмов с циклической работой, включающая критерии использования таблиц с учётом ограничений по нагреву полупроводниковых ключей.

4. Имитационная модель усовершенствованной СУ АВ с динамическим выбором таблиц углов переключения.

5. Результаты теоретических и экспериментальных исследований в ЗАО «ММК Metalurji» и ЧерМК ПАО «Северсталь», подтверждающие эффективность работы усовершенствованной СУ АВ в составе главных электроприводов прокатных станов.

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций** диссертационной работы подтверждается 1) правомочностью исходных предпосылок и положений; 2) корректным использованием математических и имитационных методов моделирования на ЭВМ; 3) соответствием полученных в работе результатов представленным в научной трудах по схожей тематике других авторов; 4) результатами экспериментальных исследований, полученными на действующих производствах – в электротехнических комплексах ЗАО «ММК Metalurji» на главных электроприводах стана горячей прокатки и стана холодной прокатки ЧерМК ПАО «Северсталь».

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

**Апробация результатов диссертационной работы.** Основные результаты диссертационной работы были доложены и обсуждены на ряде научно-технических конференций, в том числе: 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) (г. Москва, 2018); 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus) (г. Санкт Петербург, 2020); 2021, 2022 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon) (г. Магнитогорск, 2021, 2022); 021 XVIII International Scientific Technical Conference Alternating Current Electric Drives (ACED) (г. Екатеринбург, 2021); «Энергетика будущего - цифровая трансформация» (г. Липецк, 2021); 2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) (г. Сочи, 2022); 2022

International Russian Automation Conference (RusAutoCon) (г. Сочи, 2022); 77 – 80 международных научно-технических конференциях МГТУ им. Г.И. Носова (г. Магнитогорск, 2019 – 2022).

В 2020-2021 гг. экспериментальные и теоретические исследования проводились в рамках научно-исследовательской работы «Исследование электрической сети 10 кВ внутризаводского электроснабжения ЧерМК ПАО «Северсталь». Разработка мероприятий, направленных на обеспечение электромагнитной совместимости преобразователей частоты четырехклетьевого стана с питающей сетью 10 кВ ГПП-2 ПАО «Северсталь».

В 2022-2023 гг. проводились экспериментальные исследования на предприятии металлургической отрасли ЗАО «ММК Metalurji» в рамках НИОКР по теме: «Разработка и внедрение технических мероприятий по улучшению электромагнитной совместимости главных электроприводов стана горячей прокатки 1750 ЗАО «ММК Metalurji» с питающей сетью 34,5 кВ».

В 2022-2023 гг. исследования выполнялись в рамках гранта российского научного фонда «Разработка фундаментальных основ и научно обоснованных технических решений по обеспечению качества электроэнергии во внутризаводских системах электроснабжения с мощными промышленными электроприводами» (РНФ 22-19-20069).

**Публикации.** Основное содержание диссертации отражено в **19** научных трудах, в том числе **5** статей в изданиях, входящих в перечень рекомендованных ВАК РФ; **9** статей в изданиях, индексируемых Scopus; получено **2** свидетельства о регистрации программы для ЭВМ, опубликована **1** научная монография.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа включает в себя введение, 5-ть глав, заключение, список литературы из **142** наименования. Работа изложена на **160** страницах машинописного текста, содержит **74** рисунка, **8** таблиц и приложения объемом **34** страницы.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** отражено описание решаемой проблемы, обоснована актуальность исследования, намечены цели и задачи, показана теоретическая и практическая новизна, значимость выполненной работы и основные положения, выносимые на защиту.

**В первой** главе выполнен анализ существующих алгоритмов и систем управления современных АВ в составе мощных электроприводов промышленных механизмов. На рис. 1 приведены функциональные схемы возможных вариантов систем управления АВ с алгоритмами ШИМ с удалением выделенных гармоник (УВГ), подавлением выделенных гармоник (ПВГ) и ШИМ с фиксированными углами переключения (ФУП). Типовая СУ АВ представляет собой двухконтурную систему векторного регулирования во вращающейся системе координат  $dq\theta$  с ориентацией по вектору напряжения питающей сети. Внешний контур системы регулирования образован ПИ-регулятором напряжения РН, величиной задания напряжения в звене постоянного тока (ЗПТ)  $U_{DC3}$  и величиной фактического напряжения отрицательной обратной связи  $-U_{DC,факт}$ . Выход РН формирует величину задания активной составляющей тока АВ  $i_{d,з}$ . Внутренний контур образован двумя ПИ-регуляторами тока РТ  $i_d$  и РТ  $i_q$  по осям  $d$  и  $q$  соответственно. Величину задания тока по оси  $q$   $i_{q,з}$ , соответствующую реактивной составляющей тока АВ, как правило задают равной 0. На вход регуляторов тока подается разность между величиной сигнала задания тока соответствующей оси и фактической величиной тока по этой оси  $i_d$  или  $i_q$ . Для исключения влияния перекрестных связей объекта на качество регулирования координат применяется блок компенсации БКПС. Для формирования вектора напряжения на входе АВ длиной  $m$  и углом  $\theta$  применяется блок преобразования  $dq0/m\theta$ . В зависимости от применяемого алгоритма ШИМ выходные задающие величины СУ могут быть преобразованы к другому виду.

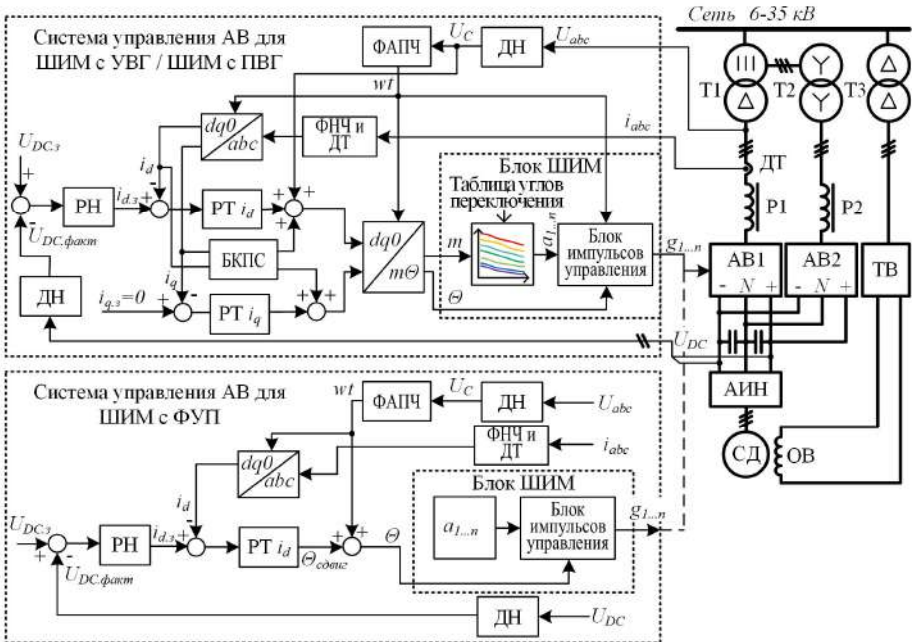


Рис. 1. Функциональная схема систем управления АВ для различных алгоритмов ШИМ

В современных АВ применяются следующие алгоритмы ШИМ: 1) пространственно-векторный ШИМ (ПЧ фирмы Siemens); 2) ШИМ с ФУП (АВ фирмы ТМЕИС); 3) ШИМ с УВГ или ПВГ (применяется в преобразователях фирм АВВ, Convertteam, Danieli); 3) ШИМ с ПВГ.

Самое большое распространение в современных ПЧ-АВ получил алгоритм ШИМ с удалением выделенных гармоник (ШИМ с УВГ). Углы переключения силовых ключей  $a_{1..n}$  для данного алгоритма рассчитываются заранее для всего диапазона изменения коэффициента модуляции  $m$  и сохраняются в памяти контроллера ШИМ, рис. 1. Расчёт углов переключения производится таким образом, чтобы в гармоническом спектре потребляемого АВ тока отсутствовали гармоники с необходимыми номерами. Число гармоник подлежащих удалению напрямую зависит от частоты коммутации силовых ключей. Увеличение частоты коммутации позволяет удалить большее число гармоник, а значит и улучшить ЭМС ПЧ с питающей сетью. Однако при этом возрастают тепловые потери на полупроводниковых ключах, что требует наличия более мощной системы охлаждения. Обычно частота коммутации IGBT-тиристоров современных АВ составляет от 150 Гц до 750 Гц.

Подобным образом реализован алгоритм ШИМ с ПВГ. Однако углы переключения силовых ключей АВ в нём рассчитываются таким образом, чтобы снизить величины отдельных высших гармоник до определенного уровня, а не полностью исключить их как в алгоритме ШИМ с УВГ. Как правило, подавление отдельных гармоник осуществляют до таких величин, которые бы обеспечили соответствие работы ПЧ национальным стандартам в области качества напряжения и ЭМС, а именно в России – ГОСТ 32144-2013.

Алгоритм ШИМ с ФУП содержит лишь один набор рассчитанных углов переключения полупроводниковых ключей. Углы переключения вычисляются таким образом, чтобы в гармоническом спектре потребляемого тока отсутствовали наиболее



значимые гармоники. Регулирование напряжения в ЗПТ ПЧ осуществляется не за счёт изменения коэффициента модуляции, как в рассмотренных ранее алгоритмах, а за счёт изменения фазы формируемого на входе АВ напряжения. В результате применения данного алгоритма ШИМ АВ лишается одного из своих достоинств – возможности работы с регулируемым  $\cos\varphi$ . В тоже время гармонический состав тока на входе АВ остаётся практически неизменным независимо от режима работы электропривода.

Рядом учёных (М.В. Буланов, А.С. Маклаков, Ц. Тао и др.) выполнены исследования по совершенствованию алгоритмов ШИМ и систем управления АВ, в том числе с учётом резонансных явлений в частотной характеристике питающей сети 6-35 кВ. Однако, предлагаемые исследования не учитывают влияние режимов работы электроприводов на базе ПЧ-АВ на показатели качества электроэнергии в системах внутриводского электроснабжения. При изменении нагрузки на электропривод во время различных динамических режимов работы СУ изменяет коэффициент модуляции, при этом для ШИМ с УВГ и ПВГ используются другие значения углов переключения силовых ключей. Величины высших гармонических составляющих, не подлежащих удалению или подавлению для указанных алгоритмов, при расчётах величин углов переключения в зависимости от коэффициента модуляции не контролируются. Их оптимальные значения для одного статического режима работы электропривода могут оказаться неоптимальными для других статических и динамических режимов и привести к ухудшению качества напряжения в системе электроснабжения предприятия.

На устранение этих недостатков существующих СУ АВ и алгоритмов ШИМ направлены исследования данной диссертационной работы.

**Во второй главе** представлены результаты экспериментальных исследований режимов работы мощных электроприводов на базе ПЧ-АВ и их влияния на качество напряжения внутриводской системы электроснабжения. Исследования проводились на двух объектах: 1) стане горячей прокатки 1750 ЗАО «ММК Metalurji», г. Дёртйол, Турция; 2) стане холодной прокатки 1750 Череповецкого металлургического комбината ПАО «Северсталь», г. Череповец, Россия;

Однолинейные схемы электроснабжения объектов исследований представлены на рис. 2 и 3. На обоих предприятиях при эксплуатации мощных ПЧ-АВ возникали проблемы с работой чувствительных электроприёмников в системах электроснабжения заводов. Это происходило из-за попадания высших гармоник тока, генерируемых АВ, в резонансную область частотной характеристики сети относительно шин секций точки общего присоединения внутриводских потребителей. Из-за значительной величины импеданса сети на данных частотах протекание даже относительно небольшой величины тока приводило к появлению значительной величины падения напряжения. В результате происходило сильное ухудшение качества напряжения во внутриводской распределительной сети.

Для проведения экспериментальных исследований были использованы следующие измерительные комплексы: 1) многоканальный регистратор РЭС-3 фирмы «Прософт-Системы» и NI-USB-6251 фирмы National Instruments (частота дискретизации 100 кГц при записи мгновенных значений напряжений и 20 кГц – для токов); 2) анализатор качества электроэнергии ELSPEC G4420 (частота дискретизации для каждого канала: напряжение – 512 измерений/цикл, ток – 256 измерений/цикл); 3) анализатор качества напряжения Fluke 435 с токовыми клещами Fluke i5s (частота дискретизации до 5 кГц); 4) анализатор качества электроэнергии ELSPEC G4430 (частота дискретизации для каждого канала: напряжение – 1024 измерений/цикл, ток – 512 измерений/цикл); 5) сервера быстрых архивов IBA (с периодом дискретизации меньше 10 мс).



На рис. 4 показаны записанные осциллограммы напряжений и токов секции D РУ-34,5 кВ главной понизительной подстанции 51EDM ЗАО «ММК Metalurji». Для приведенных мгновенных значений напряжений и токов были построены гистограммы гармонического состава, а также рассчитана частотная характеристика питающей сети относительной секции D 51EDM. На рис.4в) можно увидеть существенную несимметрию сетевых токов, которая обусловлена некорректной работой блоков синхронизации СУ АВ главных электроприводов стана из-за присутствия в токе, потребляемом АВ значительных 5 и 7 гармонических составляющих. При настройке алгоритмов ШИМ не был учтён резонанс токов в частотной характеристике питающей сети 34,5 кВ, в результате чего гармоники, генерируемые преобразователями, попадают в резонансную область. Это приводит к значительному искажению напряжения на секции D 51EDM.

На рис. 5 показаны мгновенные значения напряжений на секциях 1 и 2 РУ-10 кВ ГПП-2 ЧерМК ПАО «Северсталь» при их параллельной работе, а также на секциях 1 и 2 распределительной подстанции РП-19, питающей главные электроприводы стана холодной прокатки 1750. Аналогично предыдущему рассмотренному случаю гармоники, генерируемые ПЧ-АВ – 23, 25, 35, 37, попадают в резонансную область частотной характеристики сети относительно секций ГПП-2, что приводит к ухудшению качества напряжения в точке общего присоединения внутривозовских потребителей. Различие заключается в том, что для данного участка системы электроснабжения завода экстремум импеданса расположен в более низкочастотной области  $-f_{рез.} = 1150 \dots 1850$  Гц, рис. 5б).

Применяемые измерительные комплексы позволили осуществить анализ гармонического состава экспериментальных данных до 150 гармоники в случае ЗАО «ММК Metalurji» и до 200 гармоники для ЧерМК ПАО «Северсталь». Расчёт коэффициента  $K_U$  в соответствии с ГОСТ 32144-2013 до 40 гармоники не позволяет учитывать возможные значительные искажения при наличии резонансных явлений частотной характеристики сети в высокочастотной области. Поэтому в данной работе производился до 150 и 200 гармоник соответственно.

С целью определения влияния режимов работы главных электроприводов указанных станов были записаны мгновенные значения их основных показателей. На рис. 6 показаны графики угловых скоростей, моментов синхронных двигателей, суммарных токов АВ за цикл работы каждого стана. Также на рис. 6ж,з) отображены значения коэффициента  $K_U$  на шинах исследуемых участков систем электроснабжения предприятий. При динамических режимах работы главных электроприводов прокатных станов можно наблюдать изменения показателей качества напряжения участков системы внутривозовского электроснабжения. В том числе зафиксировано увеличение величины коэффициента  $K_U$  напряжения на секции 1 РУ-10 кВ РП-19 с ростом нагрузки электроприводов стана. Формирование подобных процессов в точке общего присоединения потребителей электроэнергии в динамических и статических режимах электроприводов значительной длительности и силы может привести к аварийным отказам чувствительных электроприёмников.

В связи с этим важной задачей является учёт режимов работы мощных электроприводов на базе ПЧ-АВ для обеспечения улучшения показателей качества электроэнергии распределительной системы электроснабжения предприятия. Оптимизация применяемых алгоритмов ШИМ АВ должна проводиться не только для номинальных режимов работы электропривода, а для всех статических и динамических режимов работы. Это требует разработки и применения усовершенствованных систем управления АВ, обеспечивающих выполнение предъявляемых требований.

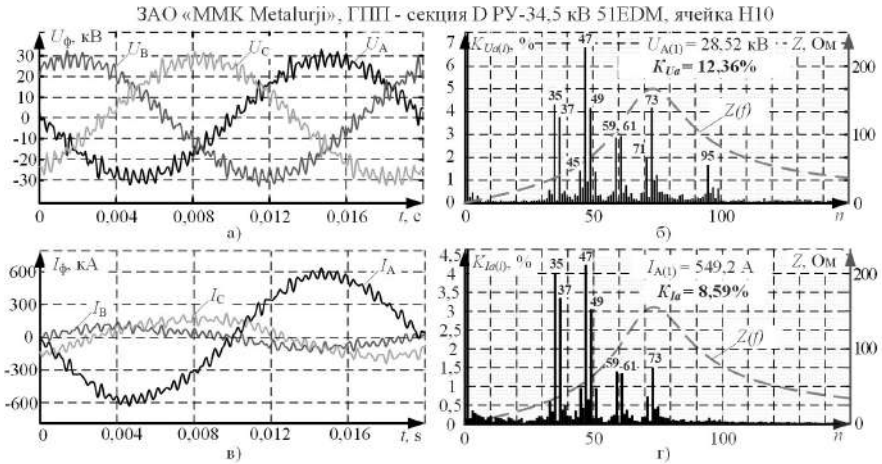


Рис. 4. Мгновенные значения а) напряжения на шинах секции D РУ-34,5 кВ 51EDM ЗАО «ММК Metalurji», б) токов ячейки Н10, питающей секцию D, б,г) их гармонический состав и частотная характеристика сети

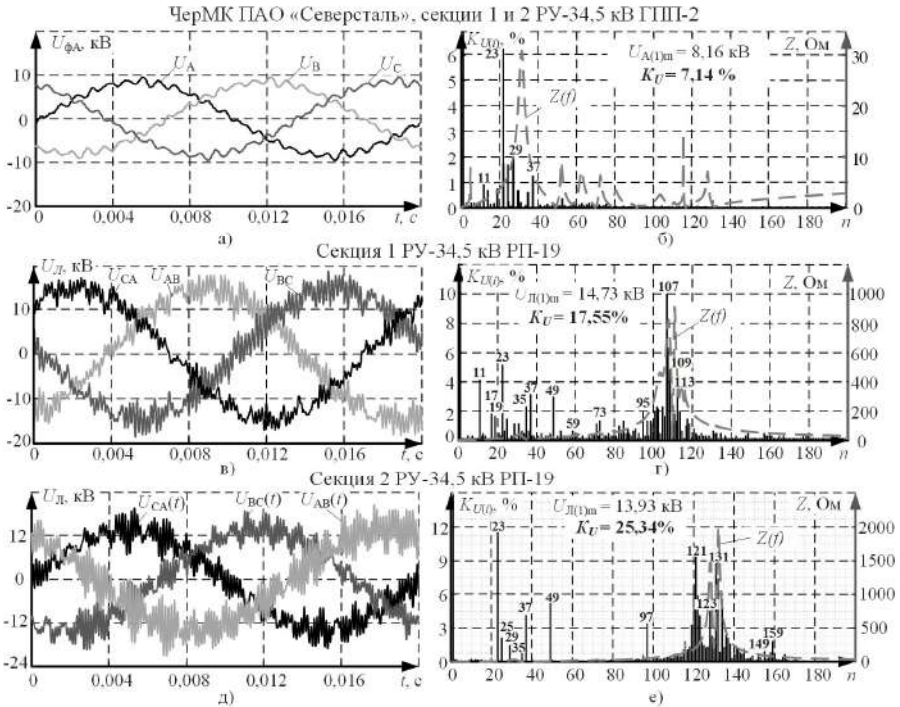


Рис. 5. Мгновенные значения напряжения на шинах а) секции 1 и 2 ГПП-2 при их параллельной работе, в) секции 1 и д) секции 2 РП-19; их гармонический состав и частотная характеристика сети (б,г,е)

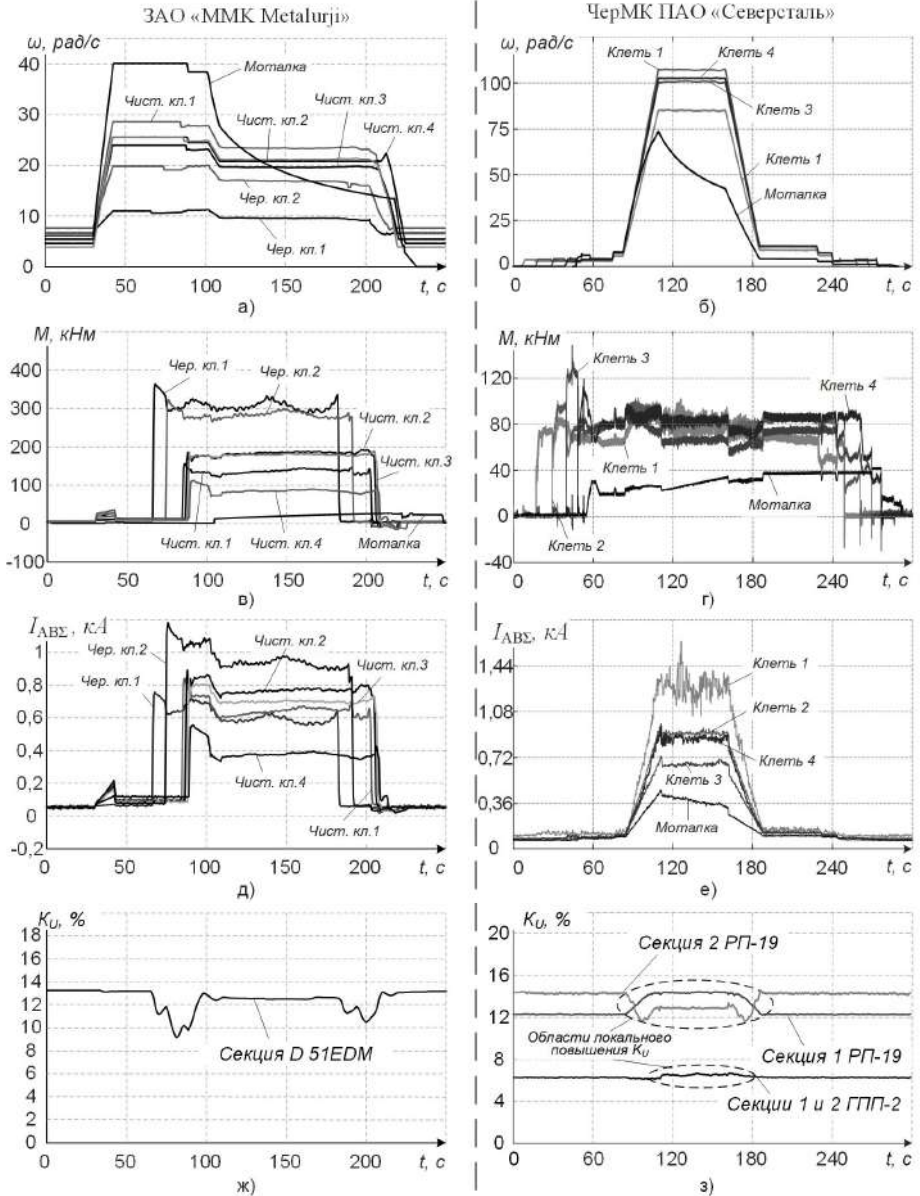


Рис. 6. Записанные мгновенные значения а,б) угловых скоростей, в,г) моментов синхронных двигателей, д,е) токов АВ ПЧ главных электроприводов прокатных станов, ж,з) коэффициента  $K_U$  различных участков системы электроснабжения для исследуемых электротехнических комплексов ЗАО «ММК Металуржі» (а,в,д,ж) и ЧерМК ПАО «Северсталь» (б,г,е,з) за цикл работы



**Третья глава** посвящена разработке усовершенствованных алгоритмов и системы управления АВ с динамическим выбором оптимальной таблицы углов переключения силовых ключей. Предлагаемая система управления АВ отличается от существующих возможностью перехода на заранее рассчитанные таблицы углов переключения силовых ключей АВ с отличными настройками в зависимости от текущего режима работы электропривода.

На рис. 7 представлена предлагаемая усовершенствованная СУ АВ. Система управления реализована на базе типовой СУ АВ с ШИМ с УВГ или ПВГ, рассмотренной в главе 1. Основные отличия заключаются в изменённом блоке ШИМ. В СУ используются три таблицы углов переключения с различной частотой коммутации и номерами удаляемых или подавляемых гармоник. На вход каждой таблицы задаётся коэффициент модуляции  $m$ . На выходах формируются величины углов переключения  $\alpha_{1...n}$ , соответствующие данному коэффициенту модуляции. Они поступают в блок импульсов управления, где формируются сигналы управления полупроводниковыми ключами АВ. Селектор обеспечивает передачу драйверам ключей сформированных сигналов управления. Номер требуемой таблицы  $n'$  формируется блоком выбора путём сравнения действующей величины тока  $i_d$  с заранее заданными граничными значениями. Величина  $n'$  передаётся в блок сравнения и блок памяти. В блоке памяти сохранён номер текущей таблицы  $n$ , который передаётся в блок сравнения. Блок сравнения анализирует текущее состояние силовых ключей и их возможное состояние при переходе. В случае, если переход на требуемую таблицу требует переключений силовых ключей меньше заданной постоянной, блок сравнения формирует логический сигнал разрешения перехода  $S_{sw}$ . Данный сигнал передаётся в блок памяти, который в этот момент сохраняет номер требуемой таблицы  $n'$  как номер текущей  $n$ . Благодаря подобному подходу удаётся минимизировать тепловые потери на ключах и возмущающие воздействия на регулируемые координаты при смене таблицы.

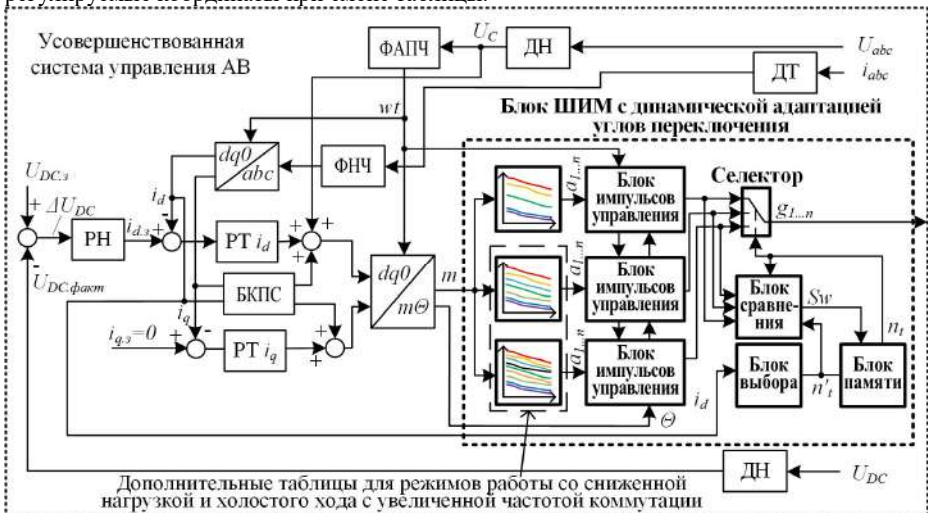


Рис. 7. Функциональная схема усовершенствованной системы управления АВ на базе алгоритма ШИМ с УВГ с возможностью динамического выбора таблицы углов переключения силовых ключей

**В четвёртой главе** представлена разработанная методика расчёта таблиц углов переключения силовых ключей для усовершенствованной СУ АВ с учётом критериев сохранения теплового баланса при увеличении частоты коммутации.

Расчёт углов переключения силовых ключей АВ для ШИМ с УВГ производится путём решения системы нелинейных уравнений:

$$\begin{cases} 4/\pi (\cos(\alpha_1) - \cos(\alpha_2) + \cos(\alpha_3) - \dots + \cos(\alpha_n)) = m; \\ \cos(k_1\alpha_1) - \cos(k_1\alpha_2) + \cos(k_1\alpha_3) - \dots + \cos(k_1\alpha_n) = 0; \\ \dots \\ \cos(k_{n-1}\alpha_1) - \cos(k_{n-1}\alpha_2) + \cos(k_{n-1}\alpha_3) - \dots + \cos(k_{n-1}\alpha_n) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\alpha_j$  – величина угла переключения силового ключа,  $n$  – число переключений за 1/4 периода,  $k_i$  – номер гармоники, подлежащей исключению,  $m$  – коэффициент модуляции.

В случае ШИМ с ПВГ система нелинейных уравнений имеет следующий вид:

$$\begin{cases} 4/\pi (\cos(\alpha_1) - \cos(\alpha_2) + \cos(\alpha_3) - \dots + \cos(\alpha_n)) = m; \\ \cos(k_1\alpha_1) - \cos(k_1\alpha_2) + \cos(k_1\alpha_3) - \dots + \cos(k_1\alpha_n) < l_1; \\ \dots \\ \cos(k_i\alpha_1) - \cos(k_i\alpha_2) + \cos(k_i\alpha_3) - \dots + \cos(k_i\alpha_n) < l_i, \end{cases} \quad (2)$$

где  $k_i$  – номер гармоники, подлежащей подавлению,  $l_i$  – предельное значение величины  $i$ -той гармонической составляющей.

При этом для двух алгоритмов должно быть выполнено условие:

$$\alpha_1 < \alpha_2 < \dots < \alpha_n < 90^\circ. \quad (3)$$

Поиск решений систем (1) и (2) производят с помощью ЭВМ. В данной работе расчёт углов переключения производится с помощью функции *fsolve*, встроенной в пакет прикладных программ Matlab. В начале осуществлялся поиск начальных значений углов для заданного коэффициента модуляции путём подстановки всех возможных значений углов в цикле программы. Полученные решения проверялись на соответствие условию (3), а также точности решения. Кроме этого, также проверялась возможность физической работы АВ с полученными решениями с учётом минимальных длительностей открытых и закрытых состояний тиристоров. В качестве основного критерия поиска оптимальной таблицы углов выступала минимизация величины коэффициента  $K_U$ . Для оптимальных начальных значений производился расчёт величин углов переключения в диапазоне изменения коэффициента модуляции.

Для нормального функционирования предлагаемой СУ важно правильное определение значений тока АВ, при которых должен происходить переход с одной таблицы углов переключения на другую. Увеличение частоты коммутации силовых ключей вызывает их усиленный нагрев. Для обеспечения устойчивой работы преобразователя необходимо выполнение условия сохранения теплового баланса выделяемой на силовых ключах энергии и отводимой системой охлаждения. Некорректные значения граничных токов для каждой таблицы могут привести либо к аварийной остановке ПЧ-АВ по перегреву, либо к недоиспользованию возможностей усовершенствованной СУ.

В связи с этим был предложен новый упрощённый вариант определения граничных значений токов для таблиц углов переключения силовых ключей с различной частотой коммутации с учётом ограничений по нагреву. Для произведения расчётов были использованы спецификации IGTC-тиристора 5SHY55L4500 4,5 кВ с максимальной отключающей способностью 5 кА, производства ABB Switzerland Ltd Semiconductors и Hitachi Energy Ltd. Тиристоры подобного класса применяются в ПЧ-АВ, установленных на главных электроприводах исследуемых прокатных станов. На рис. 8 показаны графики максимально-допустимого тока данного тиристора в зависимости от частоты коммутации, температуры окружающей среды  $T_{окр.}$  и температуры корпуса тиристора  $T_{тир.}$ , а также кривая ограничения по мощности источника питания драйвера  $P_{Др.макс.}$  Далее на рис. 8

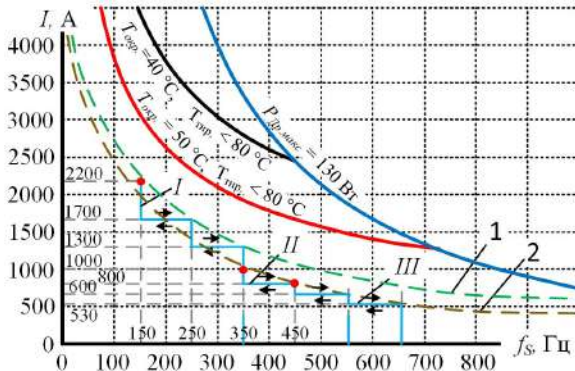


Рис. 8. Графики зависимости максимально-допустимого тока IGCT-тиристора 5SHY 55L4500 от частоты коммутации

были отмечены точки, соответствующие номинальным режимам работы АВ электроприводов исследуемых станов с учётом различных систем охлаждения. Через отмеченные точки были проведены линии 1,2 повторяющие характер графиков максимально-допустимого тока тиристора. Используя построенные линии, графическим способом были определены граничные значения токов для различных частот коммутации и построены зависимости I, II и III для усовершенствованной СУ АВ.

Анализируя режимы работы электроприводов указанных станов и АВ в их составе, рис. 6, можно сделать вывод о наличии существенных различий. У активных выпрямителей из-за технологических особенностей стана горячей прокатки можно выделить два основных режима – работа на холостом ходу и под нагрузкой. Для АВ стана холодной прокатки характерен ещё один режим – плавное нарастание тока от величин холостого хода до рабочих значений и обратный процесс – составляющий около 20-30% времени цикла. В связи с этим, было предложено использовать три таблицы углов переключения силовых ключей для усовершенствованной СУ АВ ПЧ: 1) для режима работы с номинальной нагрузкой с исходной частотой коммутации силовых ключей; 2) таблица с несколько увеличенной частотой коммутации по сравнению с первой для режима работы со сниженной нагрузкой при прокатке определённого сортамента металла для стана горячей прокатки и при разгоне электроприводов стана холодной прокатки; 3) для режима холостого хода электропривода с максимальной частотой коммутации силовых ключей. На рис. 9 показаны зоны применения каждой таблицы для АВ электроприводов станов горячей и холодной прокатки.

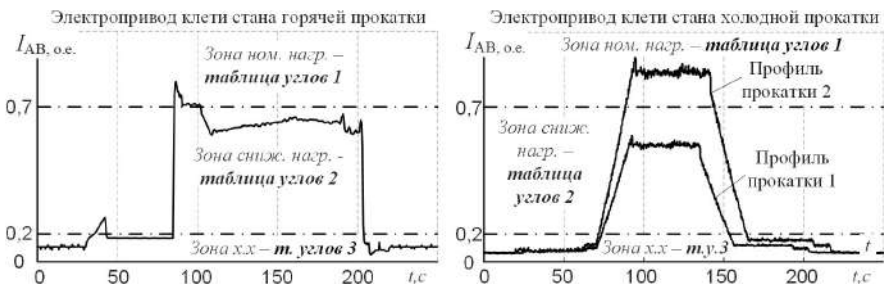


Рис. 9. Применение таблиц с различной частотой коммутации в зависимости от режима работы электропривода стана



**В пятой главе** проведены теоретические и экспериментальные исследования эффективности усовершенствованной системы управления АВ по улучшению качества электроэнергии в сетях 6-35 кВ.

Для оценки эффективности предлагаемой СУ АВ в отношении ЭМС ПЧ-АВ с питающей сетью и показателей качества электроэнергии во внутриводской распределительной сети применялась имитационное моделирование в графической среде программирования Simulink пакета прикладных программ Matlab. Были разработаны две имитационные модели: 1) системы электроснабжения главных электроприводов стана горячей прокатки 1750 ЗАО «ММК Metalurji»; 2) внутриводской системы электроснабжения района ГПП-2 ЧерМК ПАО «Северсталь». Обе имитационные модели были реализованы с учётом параметров понизительных трансформаторов, кабельных линий, токоограничивающих реакторов, электроприводов станом, основных потребителей электроэнергии. Для корректного моделирования режимов работы электроприводов, а также для проверки адекватности имитационных моделей были использованы результаты экспериментальных исследований, представленные в главе 2.

На рис. 10а) показано изменение значения коэффициента  $K_U$  на секции D главной понизительной подстанции 51EDM ЗАО «ММК Metalurji» за цикл работы прокатного стана для трёх вариантов: 1) исходный вариант, полученный в главе 2; 2) применение ШИМ с ПВГ с 5 переключениями за 1/4 периода с подавлением гармоник в резонансной области; 3) использование усовершенствованной СУ АВ с ШИМ с ПВГ с тремя таблицами углов с 5, 7 и 9 переключениями за 1/4 периода в зависимости от режима работы электроприводов. Из-за наличия резонансных явлений в широком диапазоне частотной характеристике сети наилучшие показатели для данного случая обеспечивает ШИМ с ПВГ.

На рис. 10б) приведены графики изменения коэффициента  $K_U$  за цикл работы стана холодной прокатки 1750 ЧерМК ПАО «Северсталь» для секций 1 и 2 главной понизительной подстанции ГПП-2, являющейся точкой общего присоединения. Для данного участка системы электроснабжения предприятия характерен резонанс в низкочастотной области ( $f_{рез.} = 1150 \dots 1850$  Гц - рис. 5б). В данном случае была применена усовершенствованная СУ с ШИМ с УВГ с тремя таблицами углов переключения с различной частотой коммутации и удалением гармоник в зоне резонанса.

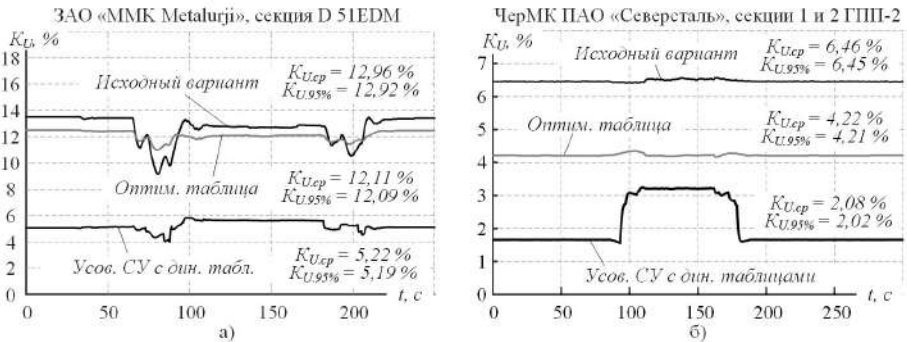


Рис. 10. Графики изменения коэффициента  $K_U$  за цикл работы прокатного стана для а) секции D 51EDM ЗАО «ММК Metalurji»; б) секций 1 и 2 ГПП-2 при их параллельной работе от одного сетевого трансформатора ЧерМК ПАО «Северсталь»

В таблице 1 произведён сравнительный анализ показателей качества электроэнергии при использовании усовершенствованной СУ с динамическим выбором таблиц углов переключения с исходными значениями показателей, полученными в главе 2, и при использовании одной оптимальной таблицы для каждого АВ.

Таблица 1 - Результаты сравнения значений показателей качества электрической энергии для точки общего присоединения электроприёмников при использовании усовершенствованной СУ АВ

Показатель	Исходный вариант (эксперимент)	СУ АВ с одной оптимальной таблицей	Усов. СУ АВ с дин. таблицами
<b>«ММК Metalurji»</b>			
Среднее значение коэффициента $K_U$ за цикл работы прокатного стана, %	12,96	12,11 (-7,02 %)	5,22 (-59,7 %)
Среднее значение коэффициента в течение 95% времени интервала $K_{U,95\%}$ , %	12,92	12,09 (-6,42 %)	5,19 (-59,8 %)
<b>ЧерМК ПАО «Северсталь»</b>			
Среднее значение коэффициента $K_U$ за цикл работы прокатного стана, %	6,46	4,22 (-34,7 %)	2,08 (-67,8 %)
Среднее значение коэффициента в течение 95% времени интервала $K_{U,95\%}$ , %	6,45	4,21 (-34,7 %)	2,02 (-68,7 %)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИИ

1. Получены новые результаты экспериментальных исследований на двух действующих металлургических предприятиях ЗАО «ММК Metalurji» и ЧерМК ПАО «Северсталь», доказывающие значимость учёта кроме основных статических режимов, также и динамических режимов электроприводов на базе ПЧ-АВ при оценке качества электроэнергии в системе внутривзаводского электроснабжения.

2. Разработана усовершенствованная система управления АВ с динамическим выбором оптимальной таблицы углов переключения силовых ключей, позволяющая в зависимости от режима работы электропривода обеспечивать максимально возможное снижение негативного влияния ПЧ-АВ на питающую сеть 6-35 кВ.

3. Разработана новая методика расчёта таблиц углов переключения силовых ключей АВ для усовершенствованной СУ, определены критерии выбора оптимальной таблицы углов переключения в зависимости от режима работы электропривода с целью минимизации возмущающих воздействий на регулируемые координаты с учётом ограничений по нагреву силовых ключей преобразователя.

4. Разработана новая математическая модель СУ АВ с динамическим выбором таблиц углов переключения. Применение математической модели усовершенствованной СУ АВ при имитационном моделировании позволит производить её предварительную настройку перед внедрением на действующем оборудовании.

5. Проведены исследования эффективности предлагаемой СУ АВ для электроприводов на базе ПЧ-АВ станков металлургических предприятий. Для ЗАО «ММК Metalurji» положительный технический эффект от внедрения предлагаемой усовершенствованной СУ АВ в отношении снижения средней величины коэффициента  $K_U$  за цикл работы прокатного стана в точке общего присоединения составит 59,7 %, для ЧерМК ПАО «Северсталь» - 67,8 %. Разработанные усовершенствованные алгоритмы, системы управления и методики приняты ко внедрению на действующих металлургических заводах ЗАО «ММК Metalurji» г. Дёртгюл, Турция и ЧерМК ПАО «Северсталь» г. Череповец, Россия. Результаты диссертации могут быть использованы на

аналогичных электротехнических комплексах с мощными электроприводами прокатных станов на базе ПЧ-АВ, функционирующих на других металлургических предприятиях России и зарубежья.

## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

### Научные статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Николаев, А. А. Улучшение качества напряжения в электрических сетях с активными выпрямителями за счет выбора оптимальных таблиц углов переключения ШИМ / А. А. Николаев, **И. Г. Гилемов** // Электротехнические системы и комплексы. – 2019. – №. 4 (45). – С. 35-42.
  2. Николаев, А. А. Разработка и исследование усовершенствованного алгоритма ШИМ активного выпрямителя с изменяемыми таблицами углов переключения / А. А. Николаев, **И. Г. Гилемов** // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2020. – №. 6. – С. 48-56.
  3. Николаев, А. А. Оценка влияния режимов работы электроприводов прокатного стана с ПЧ-АВ на качество напряжения питающей сети 10 кВ / А. А. Николаев, **И. Г. Гилемов**, М. В. Буланов // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2021. – №. 5. – С. 41-50.
  4. Николаев, А. А. Исследование усовершенствованной системы управления активных выпрямителей преобразователей частоты в составе электроприводов клетей прокатного стана / А. А. Николаев, **И. Г. Гилемов**, О. С. Малахов // Электротехнические системы и комплексы. – 2021. – №. 4 (53). – С. 62-68.
  5. Николаев, А. А. Экспериментальные исследования качества электроэнергии в сети 34,5 кВ металлургического завода ЗАО "ММК Metalurji" / А. А. Николаев, **И. Г. Гилемов**, С. А. Линьков, М. С. Светлаков // Электротехнические системы и комплексы. – 2022. – №. 3 (56). – С. 44-53.
- ### Публикации в изданиях, входящих в систему цитирования Scopus
6. Nikolaev, A. A. The Dynamic Operation Investigation of an Active Rectifier Control System with IGCT-Thyristor Switching Angle Table Selection Function / A. A. Nikolaev, **I. G. Gilemov** // 2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Сочи, Россия. – IEEE, 2022. – С. 492-497.
  7. Nikolaev, A. A. Experimental Studies of Power Quality in the 34.5 kV Network of MМК Metalurji During Operation of Electric Drives with Active Rectifiers / A. A. Nikolaev, A. S. Maklakov, **I. G. Gilemov**, M. V. Bulanov // 2022 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), Магнитогорск, Россия. – IEEE, 2022. – С. 359-366.
  8. Nikolaev, A. A. Current Electromagnetic Compatibility Problems of High-Power Industrial Electric Drives with Active Front-End Rectifiers Connected to a 6–35 kV Power Grid: A Comprehensive Overview / A. Nikolaev, A. Maklakov, M. Bulanov, **I. Gilemov**, A. Denisevich, M. Afanasev // Energies. – 2023. – Т. 16. – №. 1. – С. 293.
  9. Nikolaev, A. A. Development of a Methodology to Assess the Impact Degree of High-Power Drives with Active Rectifiers on the Electricity Quality in In-plant Power Supply Systems / A. A. Nikolaev, M. V. Bulanov, **I. G. Gilemov**, V. S. Ivekev // 2022 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), Магнитогорск, Россия. – IEEE, 2022. – С. 373-377.
  10. Nikolaev, A. A. Analysis of Influence of Frequency Converters with Active Rectifiers on the Power Quality in Internal Power Supply Systems of Industrial Enterprises / A. A. Nikolaev, **I. G. Gilemov**, A. S. Denisevich // 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Москва, Россия. – IEEE, 2018. – С. 1-4.
  11. Nikolaev, A. A. Features of the Mathematical Modeling of Frequency Converters with Active Rectifiers for Power Quality Analysis in Internal Power Supply Systems / A. A. Nikolaev, **I. G. Gilemov**, L. I. Antropova // 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), Санкт-Петербург и Москва, Россия. – IEEE, 2020. – С. 774-778.
  12. Nikolaev, A. A. Providing Electromagnetic Compatibility of High-Power Frequency Converters with Active Rectifiers at Internal Power Supply System of Cherepovets Steel Mill / A. A. Nikolaev, **I. G. Gilemov**, M. V. Bulanov, V. I. Kosmatov // 2021 XVIII International Scientific Technical Conference Alternating Current Electric Drives (ACED), Екатеринбург, Россия. – IEEE, 2021. – С. 1-8.
  13. Nikolaev, A. A. Influence Investigation of Electric Drive Operation Mode at a Rolling Mill FC with

