

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МАГНИТОГОРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Г. И. НОСОВА»

На правах рукописи



**Гилемов Ильдар Галиевич**

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

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Специальность 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Научный руководитель:  
кандидат технических наук, доцент  
Николаев Александр Аркадьевич

Магнитогорск – 2023

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ АЛГОРИТМОВ И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ АКТИВНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ В СОСТАВЕ ГЛАВНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ СТАНОВ ГОРЯЧЕЙ И ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ.....	15
1.1. Анализ силовых схем и схем питания ПЧ-АВ в составе электроприводов прокатных станов .....	16
1.2. Анализ состояния современных алгоритмов ШИМ и систем управления, применяемых в активных выпрямителях.....	21
1.3. Модифицированные алгоритмы ШИМ с удалением и подавлением выделенных гармоник.....	28
1.4. Анализ различных способов совершенствования алгоритмов ШИМ и систем управления АВ .....	32
1.5. Выводы по главе 1 .....	35
ГЛАВА 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РЕЖИМОВ РАБОТЫ МОЩНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ НА БАЗЕ ПЧ-АВ И ИХ ВЛИЯНИЯ НА КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ.....	38
2.1. Результаты экспериментальных исследований режимов работы электроприводов стана горячей прокатки 1750 и их влияния на качество напряжения внутриводской системы электроснабжения ЗАО «ММК Metalurji» .....	39
2.2. Результаты экспериментальных исследований режимов работы электроприводов стана холодной прокатки и их влияния на качество напряжения внутриводской системы электроснабжения ЧерМК ПАО «Северсталь» .....	52
2.3. Сравнительный анализ режимов работы электроприводов станом холодной и горячей прокатки с точки зрения влияния на показатели качества электроэнергии .....	62

2.4. Выводы по главе 2.....	67
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫХ АЛГОРИТМОВ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АКТИВНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ С ДИНАМИЧЕСКИМ ВЫБОРОМ ОПТИМАЛЬНОЙ ТАБЛИЦЫ УГЛОВ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ СИЛОВЫХ КЛЮЧЕЙ .....	69
3.1. Усовершенствованная система управления активного выпрямителя с динамической сменой таблиц углов переключения силовых ключей .....	69
3.2. Разработка имитационной модели усовершенствованной системы управления активного выпрямителя .....	73
3.3. Разработка имитационных моделей систем электроснабжения и электроприводов с ПЧ-АВ прокатных станов ЗАО «ММК Metalurji» и ЧерМК ПАО «Северсталь» .....	78
3.4. Оценка влияния динамической смены таблиц усовершенствованной СУ АВ на регулируемые параметры.....	92
3.5. Выводы по главе 3 .....	101
ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ТАБЛИЦ УГЛОВ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ СИЛОВЫХ КЛЮЧЕЙ АКТИВНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ С УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ .....	102
4.1. Анализ критериев физической реализуемости таблиц углов переключения силовых ключей активного выпрямителя с IGCT-тиристорами .....	102
4.2. Анализ критериев выбора оптимальной таблицы углов переключения для усовершенствованной СУ в зависимости от режима работы электроприводов клеток прокатных станов .....	108
4.3. Расчёт таблиц углов для усовершенствованной СУ АВ с алгоритмом ШИМ с УВГ .....	114
4.4. Расчёт таблиц углов для усовершенствованной СУ АВ с алгоритмом ШИМ с ПВГ .....	119
4.5. Выводы по главе 4.....	121

ГЛАВА 5. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АКТИВНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ С ДИНАМИЧЕСКИМ ВЫБОРОМ ТАБЛИЦ УГЛОВ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ТИРИСТОРОВ .....	123
5.1. Анализ эффективности применения усовершенствованной СУ АВ в электроприводах стана горячей прокатки 1750 ЗАО «ММК Metalurji» .....	123
5.2. Анализ эффективности применения усовершенствованной СУ АВ в электроприводах стана холодной прокатки ЧерМК ПАО «Северсталь».....	134
5.3. Выводы по главе 5.....	142
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	144
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	145
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	161
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	169
ПРИЛОЖЕНИЕ В .....	174
ПРИЛОЖЕНИЕ Г.....	179
ПРИЛОЖЕНИЕ Д .....	190
ПРИЛОЖЕНИЕ Е .....	192



## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы.** 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 единичного коэффициента мощности 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 наложение высокочастотных гармоник тока, генерируемых АВ, на резонансную область частотной характеристики сети. При этом происходит значительное усиление гармоник напряжения с этими же номерами в точке присоединения ПЧ-АВ. Если конфигурация внутриводской 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 внутриводских 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. Napoles, D. Voroyevich, 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 исследования, проведённые на лабораторных стендах ПЧ-АВ.

Результаты экспериментальных исследований влияния работы мощных электроприводов на базе ПЧ-АВ на систему электроснабжения в условиях действующего производства в научной литературе отражены крайне слабо. Это связано с наличием определённых трудностей для их проведения. Внедрение же предлагаемых некоторыми авторами алгоритмов и систем управления преобразователей на действующем оборудовании 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 данной цели были поставлены 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 внутривозводской распределительной сети 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 в внутривозводских распределительных сетях среднего напряжения 6-35 кВ.

Решение поставленных задач выполнялось на базе главных электроприводов стана горячей прокатки 1750 ЗАО «ММК Metalurji» и стана холодной прокатки ЧерМК ПАО «Северсталь». Содержание диссертационной работы соответствует решению поставленных задач и изложено следующим образом:

В первой главе проведен анализ схем питания и силовых схем ПЧ-АВ современных электроприводов станов холодной и горячей прокатки. Рассмотрены применяемые алгоритмы ШИМ, описана реализация систем управления АВ при использовании каждого из них. Произведён литературный обзор способов

совершенствования алгоритмов ШИМ и СУ АВ с точки зрения улучшения показателей качества электроэнергии. Выявлены недостатки существующих решений, связанные с отсутствием возможности оптимизации настроек алгоритмов ШИМ для всех статических и динамических режимов работы электроприводов на базе ПЧ-АВ.

Во второй главе приведены результаты экспериментальных исследований качества напряжения во внутривзаводских распределительных сетях 34,5 кВ ЗАО «ММК Metalurji» и 10 кВ района ГПП-2 ЧерМК ПАО «Северсталь». Произведена сравнительная оценка влияния режимов работы главных электроприводов станов холодной и горячей прокатки на базе ПЧ-АВ ACS6000 на качество электроэнергии системы внутривзаводского электроснабжения.

В третьей главе представлено описание разработанной усовершенствованной системы управления АВ с динамическим выбором таблиц углов переключения силовых ключей. Определены критерии динамической смены таблиц с целью минимизации возмущающих воздействий на регулируемые параметры электропривода. Разработаны имитационные модели внутривзаводских распределительных систем электроснабжения и электроприводов прокатных станов на базе ПЧ-АВ с усовершенствованной СУ АВ для электротехнических комплексов рассмотренных предприятий, с помощью которых произведена оценка влияния динамической смены таблиц углов переключения на параметры работы ПЧ.

В четвертой главе описана разработанная методика расчёта таблиц углов переключения силовых ключей АВ для усовершенствованной СУ. Рассмотрены критерии физической реализуемости возможных значений углов переключения для ШИМ с удалением и подавлением выделенных гармоник. Предложены и рассчитаны таблицы углов переключения с увеличенной частотой коммутации для режимов работы электропривода со сниженной нагрузкой и на холостом ходу с учётом тепловых ограничений, что позволяет обеспечить наилучшую ЭМС ПЧ-АВ с питающей сетью во всех статических и динамических режимах работы.

В пятой главе приведена оценка эффективности разработанной СУ АВ при внедрении на действующем оборудовании электроприводов стана холодной прокатки ЧерМК ПАО «Северсталь» и стана горячей прокатки 1750 ЗАО «ММК Metalurji». Проведен анализ показателей качества электроэнергии в распределительных сетях 10-34,5 кВ указанных предприятий за цикл работы прокатных станов при использовании предлагаемой СУ АВ с таблицами углов переключения, рассчитанными по разработанной методике.

В заключении приводятся основные выводы по совокупности результатов, достигнутых в ходе выполнения диссертационной работы.

**Научная новизна.** В процессе решения поставленных задач получены следующие новые научные результаты:

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, отличающая 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 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** заключается 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 IBA (с периодом дискретизации меньше 1 мс).

### **Основные положения и результаты, 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 внутривозовского 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 положения диссертационной работы докладывались и обсуждались 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.** По содержанию диссертации опубликовано **19** научных трудов, 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.

## **ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ АЛГОРИТМОВ И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ АКТИВНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ В СОСТАВЕ ГЛАВНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ СТАНОВ ГОРЯЧЕЙ И ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ**

Современные главные электроприводы прокатных станов реализуются на базе электродвигателей переменного тока: синхронных или асинхронных [1-5]. Регулирование их скоростей и моментов обеспечивают преобразователи частоты [6-8]. Высокая стоимость электроэнергии и значительная мощность электроприводов прокатных станов способствовали широкому внедрению ПЧ-АВ, обеспечивающих возможность рекуперации электрической энергии в питающую сеть и работы с единичным коэффициентом мощности [9-11].

Низкая частота коммутации силовых ключей АВ, обусловленная потерями энергии в них, приводит к значительному искажению формы потребляемого преобразователем тока [5,7,12-14]. С целью улучшения показателей ЭМС ПЧ применяются различные схемотехнические решения. Среди них можно выделить следующие способы: 1) увеличение пульсности схемы выпрямления [5,15,16]; 2) применение многоуровневых преобразователей [16-18]. Однако, подобные решения вызывают увеличение стоимости преобразователя.

Иной способ улучшения ПКЭ при использовании ПЧ-АВ связан с применением специальных алгоритмов ШИМ. Большинство методов были математически описаны ещё в прошлом веке [19-22], но практическое применение в преобразовательной технике получили лишь с развитием полупроводниковой и микропроцессорной техники.

Решение задачи повышения качества электроэнергии в электротехнических комплексах, включающих в себя ПЧ-АВ, не представляется возможным без понимания принципов работы существующих алгоритмов ШИМ и систем управления АВ. Кроме того, задача разработки усовершенствованных алгоритмов ШИМ и систем управления АВ требует проведения анализа недостатков существующих решений, поиска способов их устранения. Рассмотрим современное состояние ПЧ-АВ, их СУ и применяемые алгоритмы ШИМ и подробнее.

## **1.1. Анализ силовых схем и схем питания ПЧ-АВ в составе электроприводов прокатных станов**

Наибольшее распространение в металлургической промышленности получили трёхуровневые ПЧ с фиксированной нейтралью [23-25]. Использование преобразователей с большим числом уровней (5-, 7-, 9-уровневые и т.д.) позволяет формировать напряжение гораздо приближенное к синусоиде, что положительно сказывается на ЭМС таких преобразователей с сетью или двигателем [17,26]. Однако, при этом значительно усложняется силовая схема и система управления. В результате существенно увеличивается цена ПЧ.

Большинство современных мощных ПЧ выполняются на запираемых тиристорах с интегрированным блоком управления (IGCT-тиристоры) или на биполярных транзисторах с изолированным затвором (IGBT-транзисторы) [23,27,28]. На рисунке 1.1 показана принципиальная схема силовой части трёхуровневого ПЧ-АВ с фиксированной нейтралью, реализованного на IGCT-тиристорах [28-32]. Активный выпрямитель состоит из двенадцати полностью управляемых полупроводниковых ключей (Т1 ... Т12) и восемнадцати диодов (D1 ... D18). Каждая фаза выполнена из четырех тиристоров с подключенными к ним параллельно диодами и двух соединительных диодов (D5, D6, D11, D12, D17, D18). Они предназначены для подключения к нулевой точке преобразователя, что позволяет получить три уровня напряжений. В звене постоянного тока показаны последовательно включенные две эквивалентных емкости (С1 и С2). Точка между ними образует нулевой (средний) потенциал преобразователя.

По полностью аналогичной схеме выполнена силовая часть автономного инвертора напряжения (АИН), также состоящего из двенадцати IGCT-тиристоров (Т13 ... Т14) и восемнадцати диодов (D19 ... D34).

Рассмотрим принцип формирования напряжения на входе АВ [30,31,33]. Нулевой потенциал на входе А может быть получен при включении тиристоров Т2 или Т3, рисунок 1.2. В зависимости от направления тока возможен контур протекания через диод D5 и тиристор Т2 или через тиристор Т3 и диод D6.

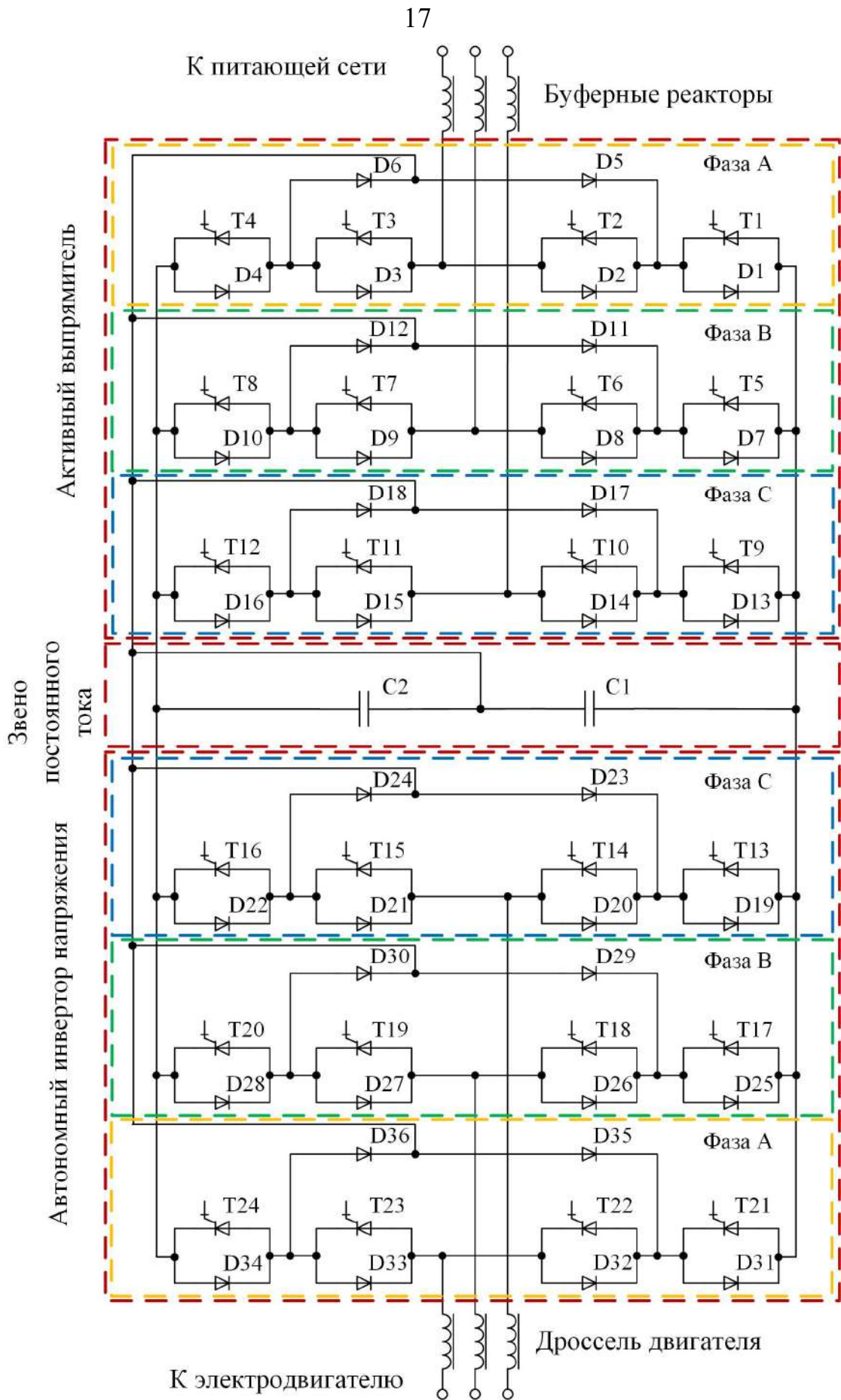


Рисунок 1.1 – Принципиальная схема силовой части трёхуровневого преобразователя частоты с активным выпрямителем

Одновременное включение тиристоров Т1 и Т2 позволяет получить на входе А потенциал  $+U_{DC}/2$ . В случае если значение потенциала на входе А больше  $+U_{DC}/2$ , то ток будет протекать через открытые диоды D1 и D2. При включении тиристоров Т3 и Т4 значение потенциала на входе А составит  $-U_{DC}/2$ . Если потенциал на входе А будет меньше  $-U_{DC}/2$ , то контур протекания тока будет проходить через открытие диоды D3 и D4.

Из четырех силовых ключей в каждой фазной стойке одновременно могут быть открыты только два, которые подключают вход А к трём точкам звена постоянного тока (ЗПТ): «+», «N», «-». Для трёхуровневого АВ существует 27 возможных комбинаций состояний фазных модулей [16,34].

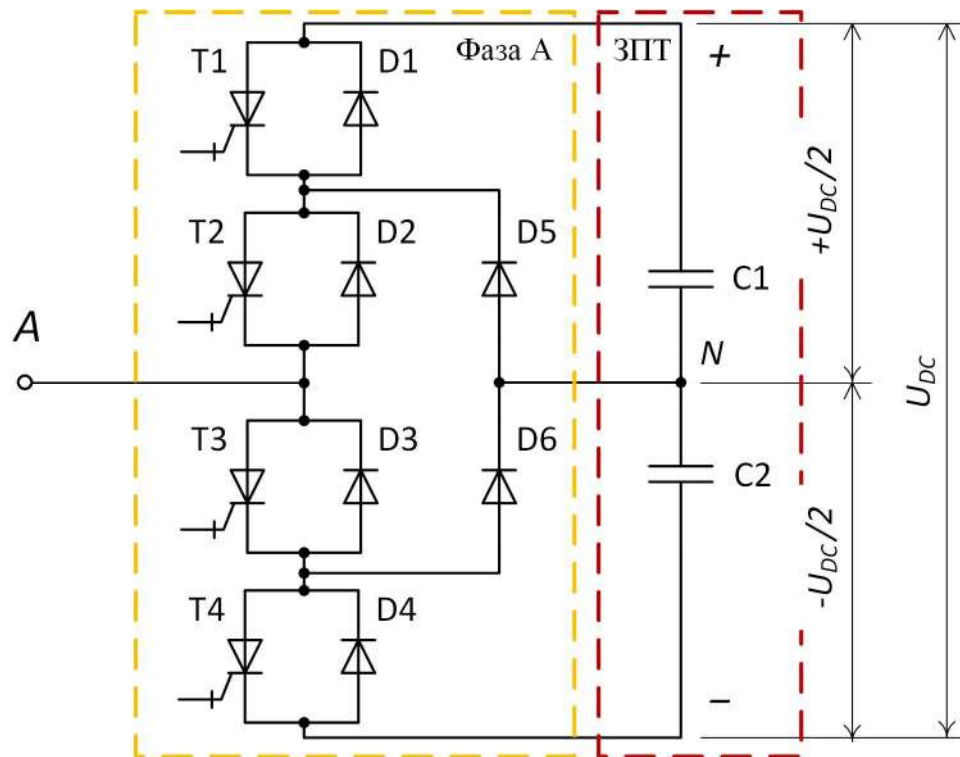


Рисунок 1.2 – Фазная стойка трёхуровневого преобразователя с фиксированной нейтралью

Простейшим вариантом реализации электропривода на базе ПЧ-АВ является 6-пульсная схема выпрямления с использованием одного двухобмоточного понизительного трансформатора, рисунок 1.3 а). Первичная обмотка трансформатора получает питание через вакуумный или масляный выключатель от шин секции 6-35 кВ распределительной подстанции предприятия. Вторичная обмотка подключена к АВ. Обмотки трансформатора имеют нулевой угол сдвига

векторов напряжений и выполняются по схеме соединения звезда/звезда или треугольник/треугольник. Асинхронный или синхронный двигатель запитан от АИН через сглаживающий дроссель. Из-за низких показателей ЭМС данную схему подключения ПЧ-АВ, как правило, применяют для электроприводов небольшой мощности. В гармоническом спектре потребляемого ПЧ тока присутствуют высшие гармоники с номерами  $6n \pm 1$ , где  $n = 1, 2, 3, \dots$

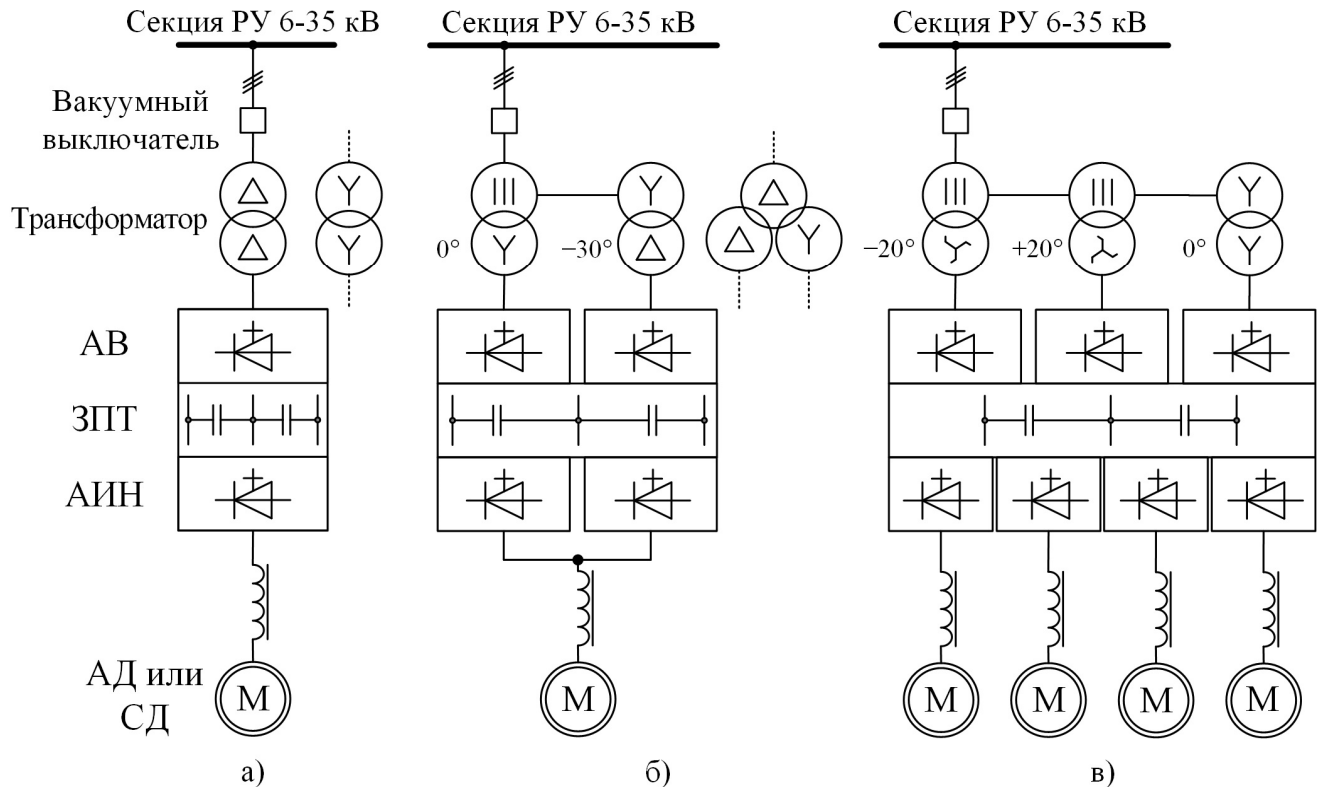


Рисунок 1.3 – Наиболее распространённые силовые схемы и схемы питания электроприводов на базе ПЧ-АВ: а) 6-пульсная схема; б) 12-пульсная схема; в) 18-пульсная схема

Для улучшения ЭМС электроприводов на базе ПЧ-АВ, а также для увеличения их мощности, применяют более сложные схемы питания [5,15,16]. На рисунке 1.3 б) показана реализация 12-пульсной схемы питания преобразователя. Для её реализации используются два трансформатора с различными группами соединения вторичных обмоток, обеспечивающих угол сдвига векторов линейных напряжений в 30°. Первичная обмотка первого трансформатора последовательно соединена с первичной обмоткой второго трансформатора, благодаря чему на

каждую из обмоток приходится только половина напряжения сети. Каждый трансформатор питает один из двух АВ. Применение двух АВ, работающих параллельно на общее ЗПТ, позволяет в два раза увеличить мощность ПЧ.

Данное схемотехническое решение позволяет значительно улучшить ЭМС ПЧ-АВ с питающей сетью. В гармоническом спектре тока первичных обмоток трансформаторов присутствуют высшие гармоники с номерами  $12n\pm 1$ , где  $n = 1, 2, 3, \dots$ .

Примером использования данной схемы питания ПЧ-АВ являются электропривода стана холодной прокатки 2000 ЛПЦ-11 ПАО «ММК», г. Магнитогорск, Россия [35], стана горячей прокатки 1750 ЗАО «ММК Metalurji», г. Дёртйол, Турция [1,36]. Также возможен вариант реализации 12-пульсной схемы с использованием одного трёхобмоточного трансформатора. Подобное решение реализовано в электроприводах стана холодной прокатки ЧерМК ПАО «Северсталь», г. Череповецк, Россия [4].

На рисунке 1.3 в) показана 18-пульсная схема питания ПЧ-АВ. Для её реализации применяются три трансформатора, имеющие угол сдвига линейных напряжений вторичных обмоток на 20 электрических градусов. Это достигается за счёт использования трансформаторов со схемами соединения звезда/зигзаг. Гармонический спектр тока, потребляемого электроприводом, содержит гармоники с номерами  $18n\pm 1$ , где  $n = 1, 2, 3, \dots$ .

Подобная схема питания применяется в электроприводах значительной мощности, как например, электропривод клетки толстолистного стана горячей прокатки 5000 ПАО «ММК» мощностью 18 МВА [3,37]. Другой вариант использования связан с реализацией многодвигательного электропривода за счёт применения нескольких АИН, получающих питание от общего ЗПТ, рисунок 1.3 в). Такую силовую схему имеет стан холодной прокатки 1750 ЗАО «ММК Metalurji».



## 1.2. Анализ состояния современных алгоритмов ШИМ и систем управления, применяемых в активных выпрямителях

Активный выпрямитель должен осуществлять двухсторонний обмен энергией с питающей сетью и поддерживать заданную величину напряжения в ЗПТ. Для выполнения этой задачи служит система управления АВ [29, 38-45], включающая в себя контура регулирования токов и напряжения, а также блок ШИМ. Рассмотрим типовую систему управления АВ, рисунок 1.4.

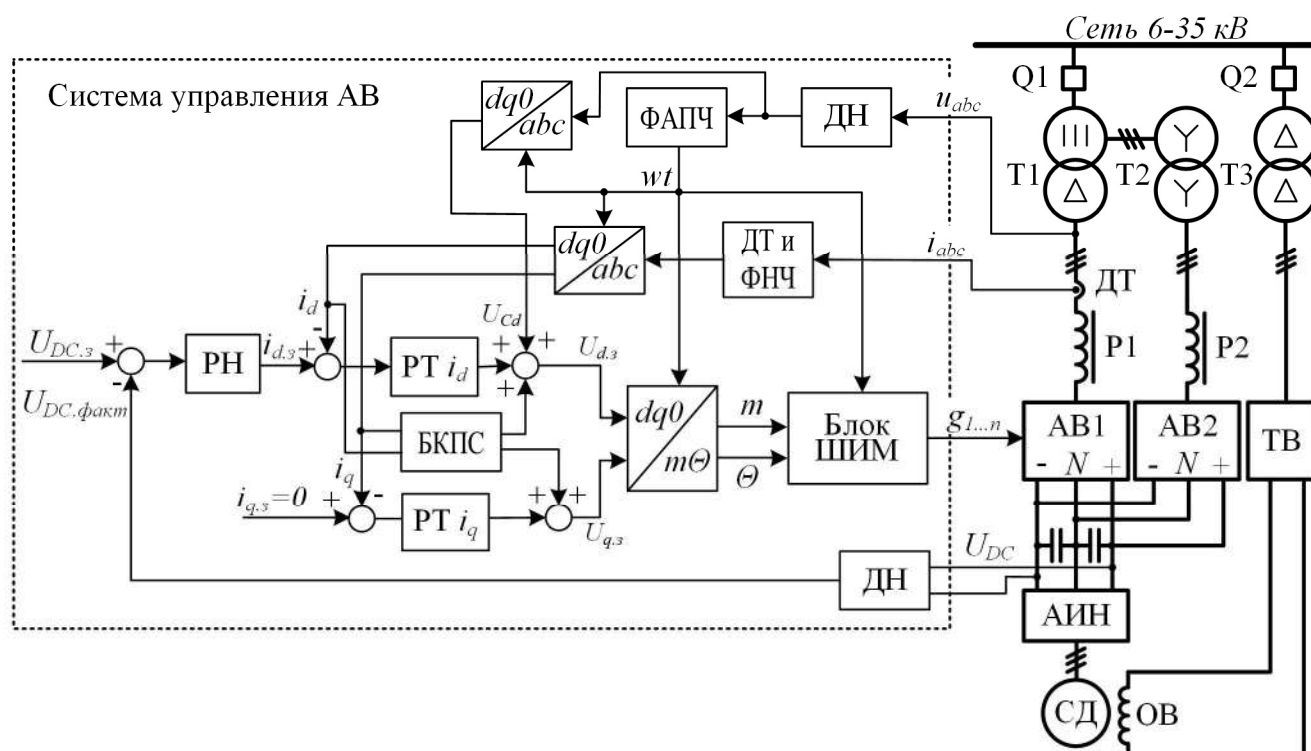


Рисунок 1.4 – Типовая функциональная схема системы управления активного выпрямителя

В правой части рисунка показана силовая схема электропривода, выполненная по рассмотренной ранее 12-пульсной схеме питания. Дополнительно на рисунке 1.4 показан тиристорный возбудитель ТВ, питающий обмотку возбуждения ОВ синхронного двигателя СД.

Система управления АВ реализована с учетом следующих допущений: 1) симметричности трёхфазной системы напряжений питающей сети; 2) идеальной синхронизации с питающей сетью; 3) балансе напряжений на каждом эквивалентном конденсаторе в ЗПТ относительно нейтральной точки ПЧ. Система

управления представляет собой двухконтурную систему векторного регулирования во вращающейся системе координат  $dq0$  с ориентацией по вектору напряжения питающей сети [46]. Функцию синхронизации с питающей сетью выполняет блок фазовой автоподстройки частоты ФАПЧ, который формирует опорный сигнал  $\omega t$ . Для преобразования напряжений питания АВ  $u_{abc}$  и напряжения в звене постоянного тока  $U_{DC}$  в цифровой вид применяются датчики напряжения ДН. Фильтр низких частот ФНЧ необходим для фильтрации от высших гармонических составляющих потребляемых АВ токов  $i_{abc}$ . Для перевода величин токов и напряжений из трёхфазной неподвижной системы координат  $abc$  во вращающуюся систему координат  $dq0$  применяется блок  $dq0/abc$  в соответствии с преобразованием Парка-Горева [47]:

$$\begin{aligned} i_d &= \frac{2}{3} (i_a \cos(\omega t) + i_b \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + i_c \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3})), \\ i_q &= \frac{2}{3} (i_a \sin(\omega t) + i_b \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + i_c \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3})), \end{aligned} \quad (1.1)$$

$$i_0 = \frac{1}{3} (i_a + i_b + i_c);$$

$$U_d = \frac{2}{3} (U_a \cos(\omega t) + U_b \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + U_c \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3})). \quad (1.2)$$

Внешний контур системы регулирования образован ПИ-регулятором напряжения РН, на который поступает разность величины задания напряжения в ЗПТ  $U_{DC,z}$  и величины фактического напряжения отрицательной обратной связи  $-U_{DC,факт}$ . Выход РН формирует величину задания ортогональной составляющей тока АВ  $i_{d,z}$ , соответствующей заданию активной составляющей тока. 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  $q$   $i_{q,z}$ , соответствующую реактивной составляющей тока АВ, как правило устанавливают равной 0. На вход регуляторов тока подаётся разность между величиной сигнала задания тока соответствующей оси и фактической величиной тока по этой оси  $i_d$  или  $i_q$ . Функцию компенсации перекрёстных связей объекта регулирования выполняет блок БКПС. Величина задания напряжения на входе АВ выражается через ортогональные составляющие  $U_{d,z}$  и  $U_{q,z}$ . Блок преобразования  $dq0/m\theta$  позволяет привести их к представлению в

виде коэффициента модуляции  $m$ , пропорционального вектору напряжения  $U$  на входе АВ, и углом сдвига  $\theta$  данного вектора в соответствии с формулами:

$$m = \frac{\sqrt{U_{d.3}^2 + U_{q.3}^2}}{U_{л}}, \quad (1.3)$$

$$\theta = \operatorname{tg}^{-1} \frac{U_{q.3}}{U_{d.3}}, \quad (1.4)$$

где  $U_{л}$  – величина линейного напряжения на входе АВ.

Данные значения передаются в блок ШИМ. В зависимости от применяемого типа ШИМ вид системы управления или задающие сигналы могут иметь несколько иной вид.

Рассмотрим типы ШИМ применяемых в современных АВ. Среди них можно выделить следующие: 1) синусоидальная или классическая ШИМ [30,48] (применяется в преобразователях фирмы ТМЕІС); 2) пространственно-векторная ШИМ [49-54] (ПЧ фирмы Siemens); 3) предварительно запрограммированная ШИМ. Наибольшее распространение в АВ получили алгоритмы ШИМ, относящиеся к последнему типу. Среди них необходимо отметить следующие: 1) ШИМ с фиксированными углами переключения (ШИМ с ФУП) [55-58] (АВ фирмы ТМЕІС); 2) ШИМ с удалением выделенных гармоник (ШИМ с УВГ) [59-68] (применяется в преобразователях фирм АВВ, Convertteam, Danieli); 3) ШИМ с подавлением выделенных гармоник (ШИМ с ПВГ) [41,69-77].

### *Синусоидальный алгоритм ШИМ*

Принцип работы синусоидального алгоритма ШИМ заключается в формировании импульсов управления силовыми ключами АВ при сравнении опорного пилообразного сигнала фиксированной частоты с сигналом задания напряжения. Данный алгоритм ШИМ прост в реализации, однако не обладает другими значимыми преимуществами. Как правило, его применяют в ПЧ малой мощности, реализованных на IGBT-транзисторах и работающих с большой частотой коммутации (1-30 кГц) [48,78].

На рисунке 1.5 в упрощённом виде показана функциональная схема СУ АВ при использовании классического или синусоидального алгоритма ШИМ. Двухконтурная система регулирования полностью аналогична типовой, рассмотренной ранее, за исключением вида формируемого управляющего сигнала, который представляет собой синусоиду  $U_3$  требуемого напряжения на входе АВ. В блоке сравнения происходит формирование логических сигналов необходимого состояния силовых ключей АВ путём сравнения величин сигнала задания  $U_3$  и опорного напряжения пилообразной формы  $U_{опор}$ , формируемого соответствующим блоком. Для трехуровневых АВ применяют два пилообразных опорных напряжения для положительной и отрицательной полуволн. Частота коммутации вентилях АВ зависит от частоты пилообразного опорного напряжения. В блоке формирования импульсов управления в соответствии с логическими сигналами необходимого состояния силовых ключей формируются импульсы управления ими.

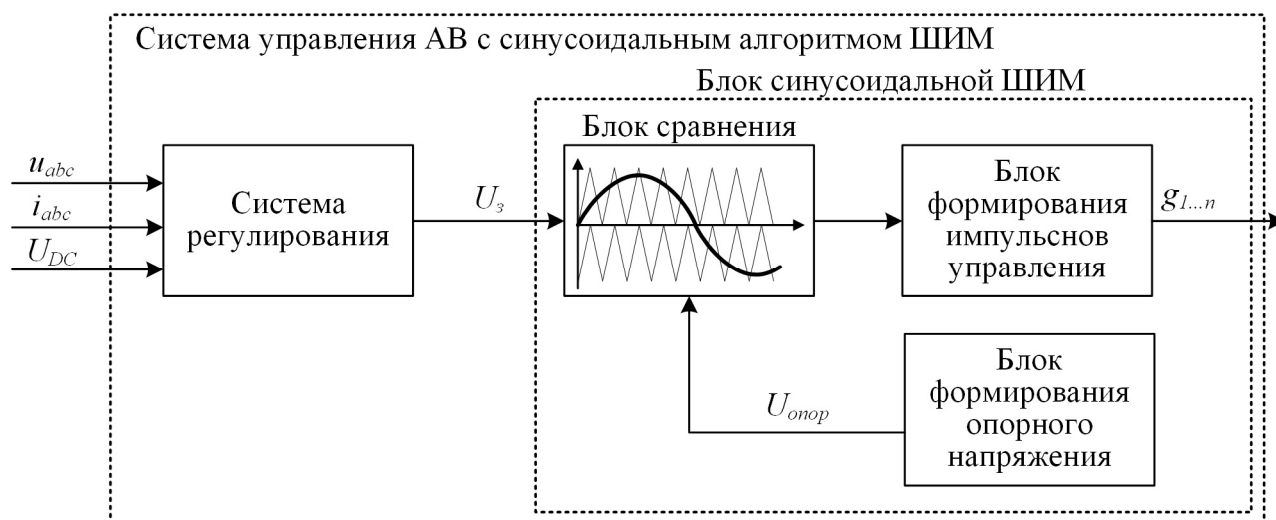


Рисунок 1.5 – Функциональная схема СУ АВ с синусоидальным/классическим алгоритмом ШИМ

### *Пространственно-векторный алгоритм ШИМ*

При пространственно-векторной ШИМ происходит вычисление не мгновенных значений напряжений, а расчёт момента и длительности включения определённых силовых ключей с целью формирования заданного вектора напряжения [49-54]. Возможны различные способы пространственно-векторной

ШИМ. Один из них связан с минимизацией числа переключений силовых ключей с целью снижения тепловых потерь [24,53,79], что увеличивает КПД преобразователя. Другие способы предусматривают улучшение гармонического состава напряжения преобразователя [51]. Однако, для реализации пространственно-векторной ШИМ требуется микроконтроллер со значительными вычислительными мощностями.

В данном алгоритме ШИМ напряжение на входе АВ выражают с помощью теории обобщённого пространственного вектора. При ориентации оси вещественных чисел по фазе А можно получить следующее выражение для пространственного вектора напряжения:

$$\bar{U} = 2/3 \left( U_{A0} e^{j \cdot 0} + U_{B0} e^{j \frac{2\pi}{3}} + U_{C0} e^{-j \frac{2\pi}{3}} \right), \quad (1.4)$$

где  $U_{A0}$ ,  $U_{B0}$ ,  $U_{C0}$  – величины первых гармоник фазных напряжений АВ.

Используя уравнение (1.4) для каждой из 27 возможных комбинаций состояния силовых ключей трехуровневого преобразователя, можно получить 18 базовых, 3 нулевых и 6 дополнительных векторов напряжения.

На рисунке 1.6 представлена диаграмма пространственного вектора, которая представляет из себя симметричный шестигранник, разделенный на шесть секторов со сдвигом на 60 градусов. Каждый сектор состоит из четырех регионов, образованных вершинами базовых векторов напряжения.

На рисунке 1.7 показана функциональная схема СУ АВ, выполненная на базе пространственно-векторной ШИМ. Система регулирования напряжения аналогична показанной на рисунке 1.4. Блок ШИМ функционирует следующим образом. Вначале определяется сектор и регион требуемого вектора напряжения  $\bar{U}$  на основании его длины и положения в пространстве, определяемого углом  $\theta$  и опорным сигналом синхронизации  $wt$ . Это необходимо для определения трёх ближайших базовых векторов. Длительность включения каждого из них вычисляется таким образом, чтобы на периоде квантования  $T_S$  результирующий вектор напряжения АВ соответствовал заданному.

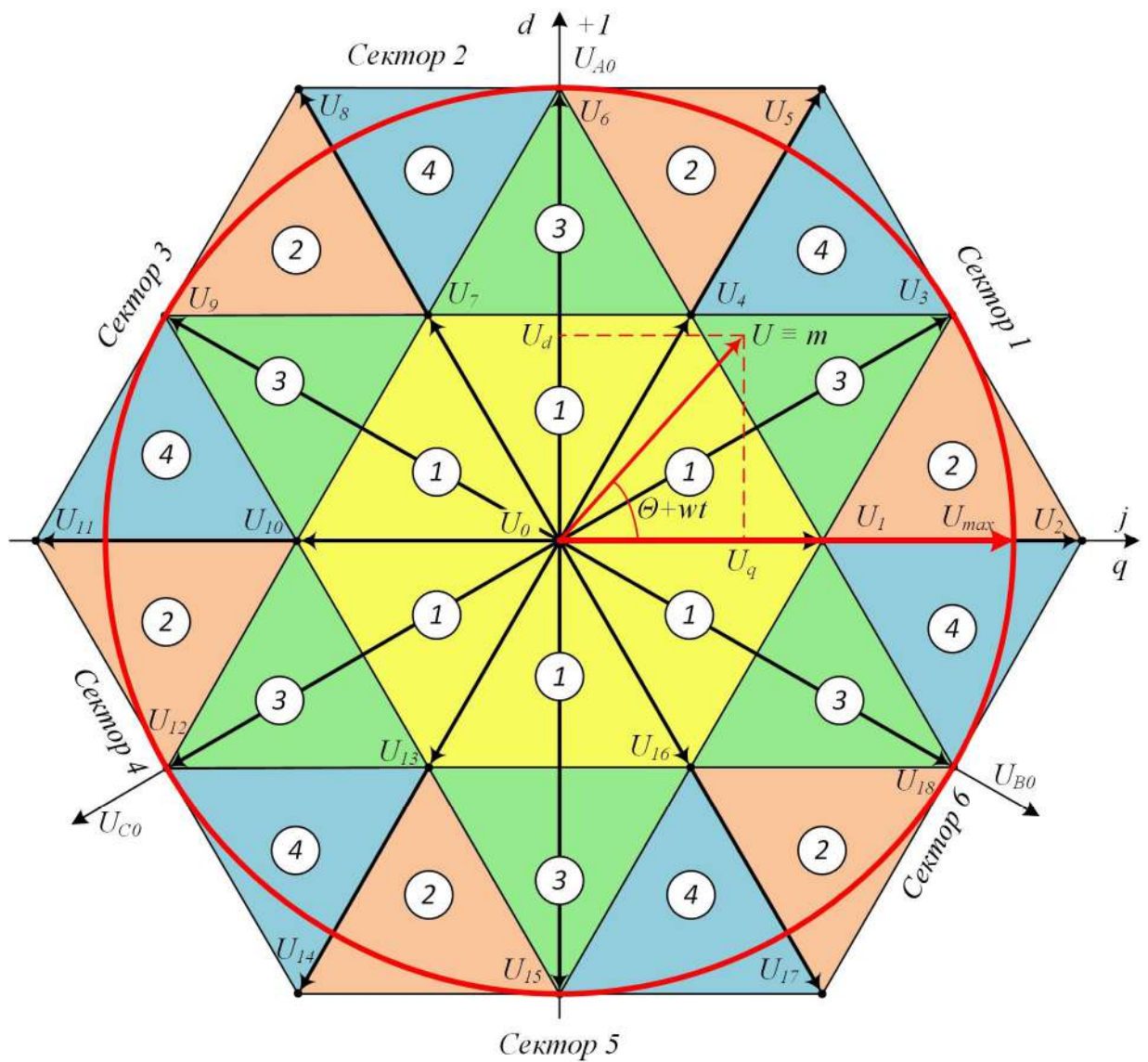


Рисунок 1.6 – Диаграмма пространственных векторов трёхуровневого АВ

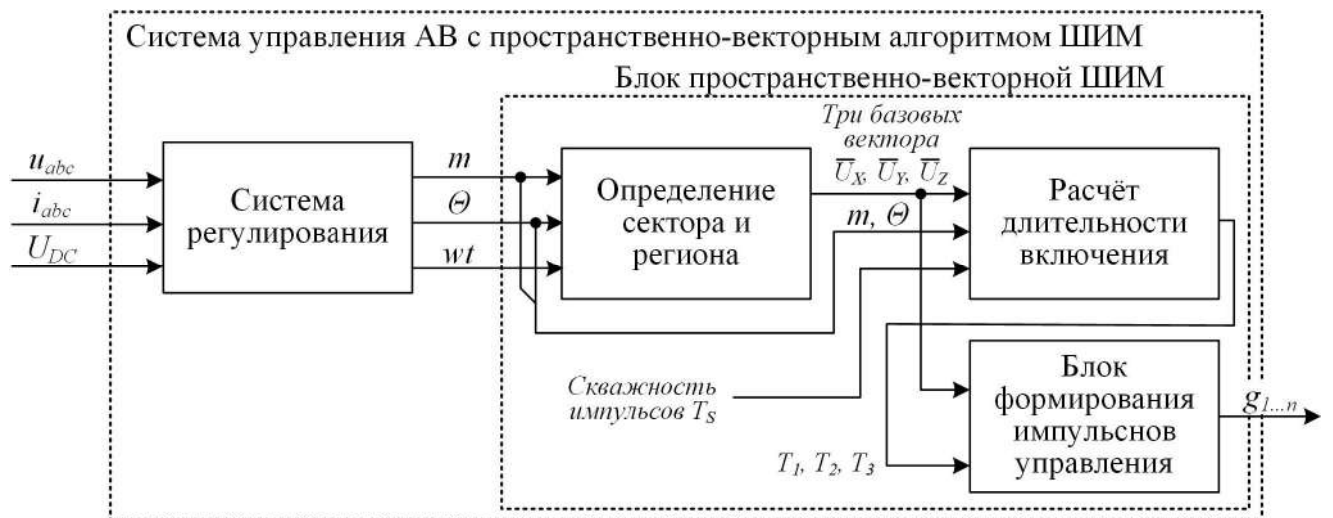


Рисунок 1.7 – Блок схема СУ АВ с пространственно-векторным алгоритмом ШИМ

*Алгоритм ШИМ с фиксированными углами переключения*

Алгоритм ШИМ с ФУП относится к категории предварительно запрограммированных алгоритмов ШИМ. Углы переключения полупроводниковых ключей рассчитываются на основании критерия минимизации тепловых потерь при переключениях и ограничения величин высших гармоник тока, генерируемых преобразователем. В преобразователях TMEIC фирмы TOSHIBA MITSUBISHI углы переключения состоят из двух наборов для положительной и отрицательной полуволн, т.е. кривая фазного напряжения обладает полуволновой симметрией. Особенностью данного алгоритма является то, что 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 фиксированной величины по отношению к фазе напряжения питающей сети. Т.е. регулирование активной составляющей тока АВ осуществляется за счёт изменения реактивной составляющей тока.

На рисунке 1.8 приведена упрощённая функциональная схема системы управления АВ при использовании алгоритма ШИМ с ФУП. Внутренний контур состоит только из одного ПИ-регулятора тока по ортогональной оси  $d$ . Выход регулятора тока формирует угол сдвига  $\theta_{сдвиг}$  по отношению к фазе напряжения питающей сети. В блоке ШИМ сохранены значения углов переключения в специальной таблице. В зависимости от угла  $\theta$  требуемого вектора напряжения на входе АВ и значений углов переключения формируются импульсы управления полупроводниковыми вентилями.

В результате применения данного алгоритма ШИМ АВ лишается одного из своих достоинств – возможности работы с регулируемым  $\cos\varphi$ . Несмотря на то, что гармонический состав тока на входе АВ остаётся практически неизменным независимо от режима работы электропривода, ШИМ с ФУП не получил широкого распространения в АВ мощных ПЧ.

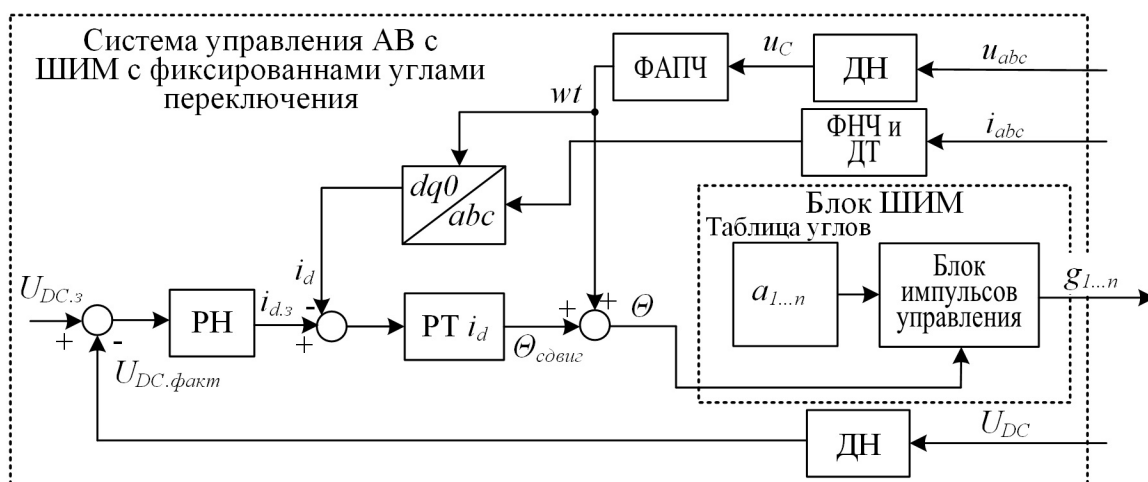


Рисунок 1.8 – Функциональная схема СУ АВ на основе ШИМ с фиксированными углами переключения

Особый интерес с точки зрения повышения ЭМС мощных ПЧ-АВ с питающей сетью представляют алгоритмы ШИМ с УВГ и ШИМ с ПВГ. Подробно рассмотрим их.

### 1.3. Модифицированные алгоритмы ШИМ с удалением и подавлением выделенных гармоник

#### *Алгоритм ШИМ с удалением выделенных гармоник*

Наибольшее распространение в современных мощных ПЧ-АВ получил алгоритм ШИМ с УВГ [7,8,59-68], позволяющий снизить уровень электромагнитных помех преобразователя при относительно низкой частоте коммутации силовых ключей. Данный алгоритм применяется в преобразователях фирмы АВВ серии ACS 6000, Q-Drive Danieli, ПЧ-АВ фирмы Convertteam и других. Теоретическое описание данного метода было представлено ещё в 70-х годах прошлого века [19-21], однако распространение он получил только с появлением современных полностью управляемых полупроводниковых ключей и микропроцессоров.

Рассмотрим форму напряжения на входе трёхуровневого АВ при четвертьволновой симметрии и 5 переключениях силовых ключей за 1/4 периода, рисунок 1.9.



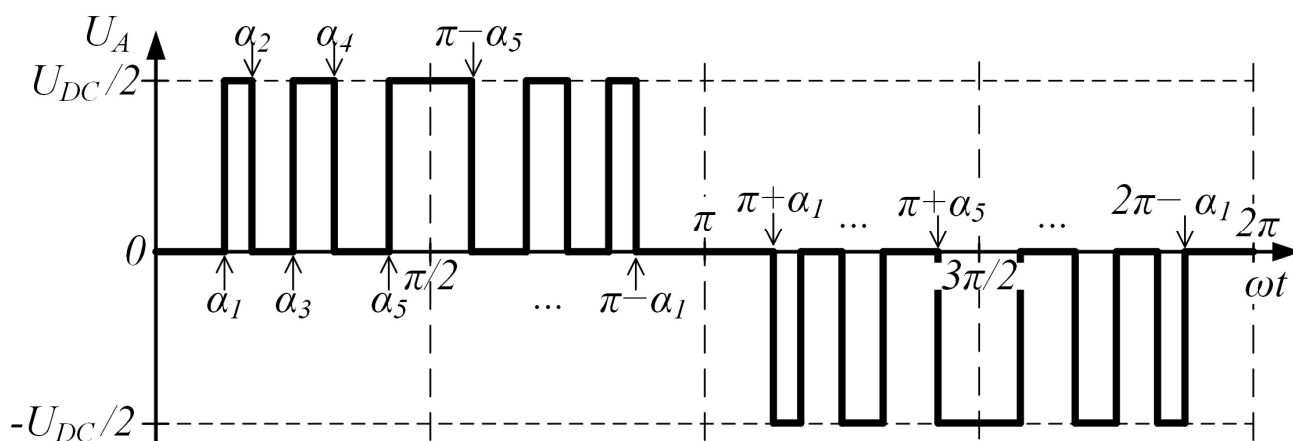


Рисунок 1.9 – Осциллограмма фазного напряжения на входе АВ при четвертьволновой симметрии

Данный вид симметрии является самым распространённым, помимо него также различают полуволновую симметрию и несимметричную форму напряжения [80-86]. Математическое выражение модулируемого сигнала напряжения на входе АВ  $u(\omega t)$  для данного алгоритма ШИМ основано на разложении в ряд Фурье и вычислении углов переключения  $a$  таким образом, чтобы устранить из гармонического спектра выбранные гармоники. Для рассматриваемого сигнала на рисунке 1.9 выражение имеет следующий вид:

$$u(\omega t) = \sum_{k=1,3,4,\dots}^{\infty} \left( \frac{4 \cdot U_{DC}/2}{k\pi} \left[ \sum_{n=1}^5 (-1)^{n+1} \cos(k\alpha^n) \right] \cdot \sin(k\omega t) \right), \quad (1.5)$$

где  $n$  – номер переключения,  $k$  – номер гармонической составляющей.

Расчёт значений углов переключения силовых ключей для ШИМ с УВГ осуществляется с помощью следующей системы уравнений, представленной в общем виде:

$$\begin{cases} \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^N (-1)^{n+1} \cos(a_n) = m \\ \frac{4}{k\pi} \sum_{n=1}^N (-1)^{n+1} \cos(k \cdot a_n) = 0, \end{cases} \quad (1.6)$$

где  $N$  – число переключений за четверть периода,  $k$  – номер удаляемой гармоники,  $m$  – коэффициент модуляции в диапазоне от 0 до  $4/\pi$ .

Количество высших гармонических составляющих, которые могут быть удалены, ограничено частотой коммутации полупроводниковых вентилях и определяется по формуле:

$$K = N - 1. \quad (1.7)$$

Поиск решений уравнения (1.6) может быть осуществлён итерационными численными методами с помощью ЭВМ [37]. Результат решения при применении данных методов зависит от начальных значений углов переключений. Существуют способы [87-94] определения начальных значений углов для ускорения поиска решения итерационным методом. При значительных мощностях ЭВМ применяют способ циклической подстановки начальных значений углов переключения в заданную систему уравнений. Среди всех возможных вариантов решений выбирают те, которые наилучшим образом соответствуют предъявляемым критериям оптимизации.

Полученные значения углов переключения  $a_{1..N}$  должны соответствовать условию:

$$a_1 < a_2 < \dots < a_N < \pi/2. \quad (1.8)$$

Рассчитанные значения углов переключения силовых ключей для всего диапазона коэффициента модуляции сохраняются в памяти контроллера ШИМ, рисунок 1.10. Система регулирования при данном методе ШИМ полностью аналогична типовой, рассмотренной ранее. В зависимости от величины коэффициента модуляции  $m$  таблица углов переключения передаёт в блок импульсов управления значения углов  $a_{1..N}$ . Формирование импульсов управления тиристорами осуществляется с учётом синхронизации с питающей сетью  $wt$  и необходимого угла  $\theta$  фазового сдвига напряжения на входе АВ.

Частота коммутации силовых ключей современных АВ на базе IGBT-тиристоров составляет от 150 Гц до 550 Гц. Номера удаляемых гармоник определяются в соответствии с силовой схемой электропривода. Для обеспечения корректной работы блока ФАПЧ с минимальной постоянной фильтра удаляют 5 и 7 гармоники.

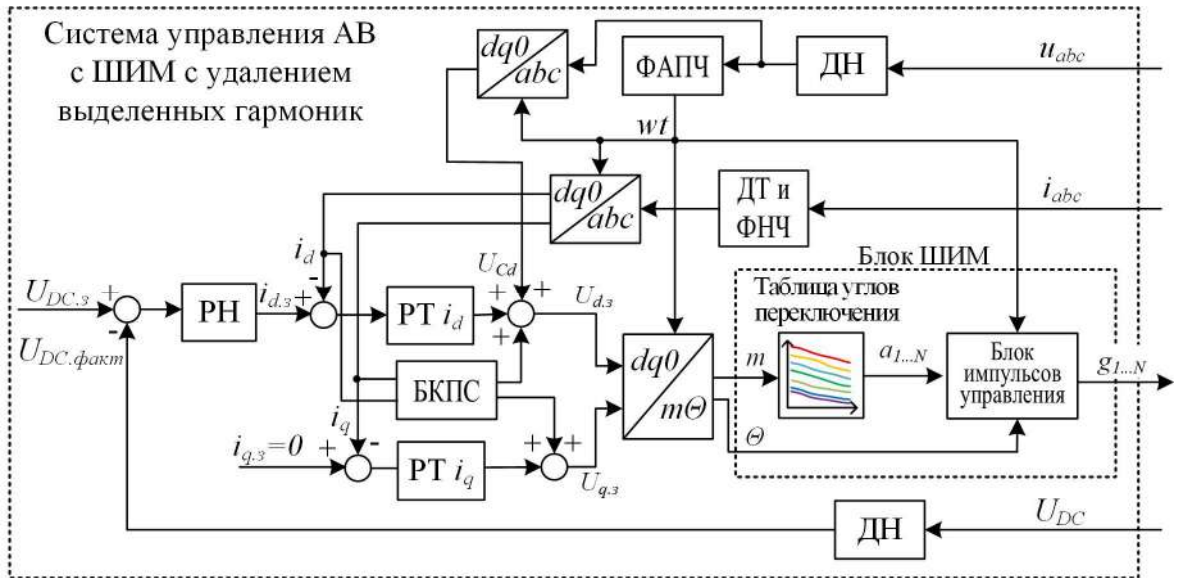


Рисунок 1.10 – Функциональная схема системы управления АВ с алгоритмом ШИМ с УВГ

#### Алгоритм ШИМ с подавлением выделенных гармоник

Иной подход применяется в ШИМ с ПВГ, в котором обеспечение ЭМС ПЧ-АВ осуществляется не за счёт удаления отдельных гармоник, а благодаря снижению уровней выбранных гармонических составляющих [69-77].

Система уравнений для расчёта значений углов переключения силовых ключей для ШИМ с ПВГ имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^N (-1)^{n+1} \cos(a_n) = m \\ \left| \frac{4}{\pi \cdot k \cdot U_1} \sum_{n=1}^N (-1)^{n+1} \cos(k \cdot a_n) \right| \leq L_k, \end{cases} \quad (1.9)$$

где  $N$  – число переключений за четверть периода,  $k$  – номер подавляемой гармоники,  $m$  – коэффициент модуляции в диапазоне от 0 до  $4/\pi$ ,  $U_1$  – величина первой гармоники напряжения,  $L_k$  – ограничение уровня  $k$ -ой гармонической составляющей.

Значение  $L_k$  определяется в соответствии с действующими стандартами качества электроэнергии [95-97]. Решение уравнения (1.9) также, как и при ШИМ с УВГ, осуществляют итерационными числовыми методами. Найденные решения должны соответствовать условию (1.8).

Существует и иной подход, связанный с отысканием значений углов переключения таким образом, чтобы минимизировать величину  $K_U$ . В таком случае система уравнений (1.9) используется в виде целевой функции для задачи минимизации:

$$\sqrt{\frac{U_{k1}^2 + U_{k2}^2 + \dots + U_K^2}{U_1^2}} \rightarrow \min, \quad (1.10)$$

где  $U_{k1}$ ,  $U_{k2}$ ,  $U_K$  – подавляемые гармонические составляющие.

Для решения целевого выражения (1.10) могут быть использованы различные алгоритмы поиска минимума функции [98].

Система управления АВ с ШИМ с ПВГ полностью повторяет СУ АВ с ШИМ с УВГ, рисунок 1.10. В таблицу углов переключения блока ШИМ сохраняется массив значений углов в зависимости от коэффициента модуляции, рассчитанный по формулам (1.9) или (1.10).

#### **1.4. Анализ различных способов совершенствования алгоритмов ШИМ и систем управления АВ**

Несмотря на широкое применение, ШИМ с УВГ не всегда способен обеспечить приемлемые показатели качества напряжения в электрических комплексах с ПЧ-АВ.

Проблемы с эксплуатацией мощных ПЧ-АВ часто возникают в распределительных сетях промышленных предприятий с протяжёнными кабельными линиями. Взаимное влияние суммарной ёмкости кабельных линий и индуктивности понизительных трансформаторов вызывает резонанс токов в системе электроснабжения. Как уже было ранее отмечено, ШИМ с УВГ в большинстве случаев настраивается на удаление значимых низкочастотных гармоник, наличие резонансных явлений в частотной характеристике внутриводской сети должным образом не учитывается. В результате попадания высших гармонических составляющих тока, генерируемых АВ, в резонансную

область происходит значительное искажение формы кривой напряжения и ухудшение работы остальных электроприёмников [4,99-102].

В работах [103-105] М.В. Буланов предлагает способ выявления резонансных явлений во внутривзаводских сетях 6-35 кВ при помощи специальных импульсных воздействий со стороны ПЧ-АВ и дальнейшего спектрального анализа осциллограмм тока и напряжения. Расчёт оптимальных параметров ШИМ с учётом резонансной области позволяет улучшить показатели качества напряжения питающей сети, рисунок 1.11.

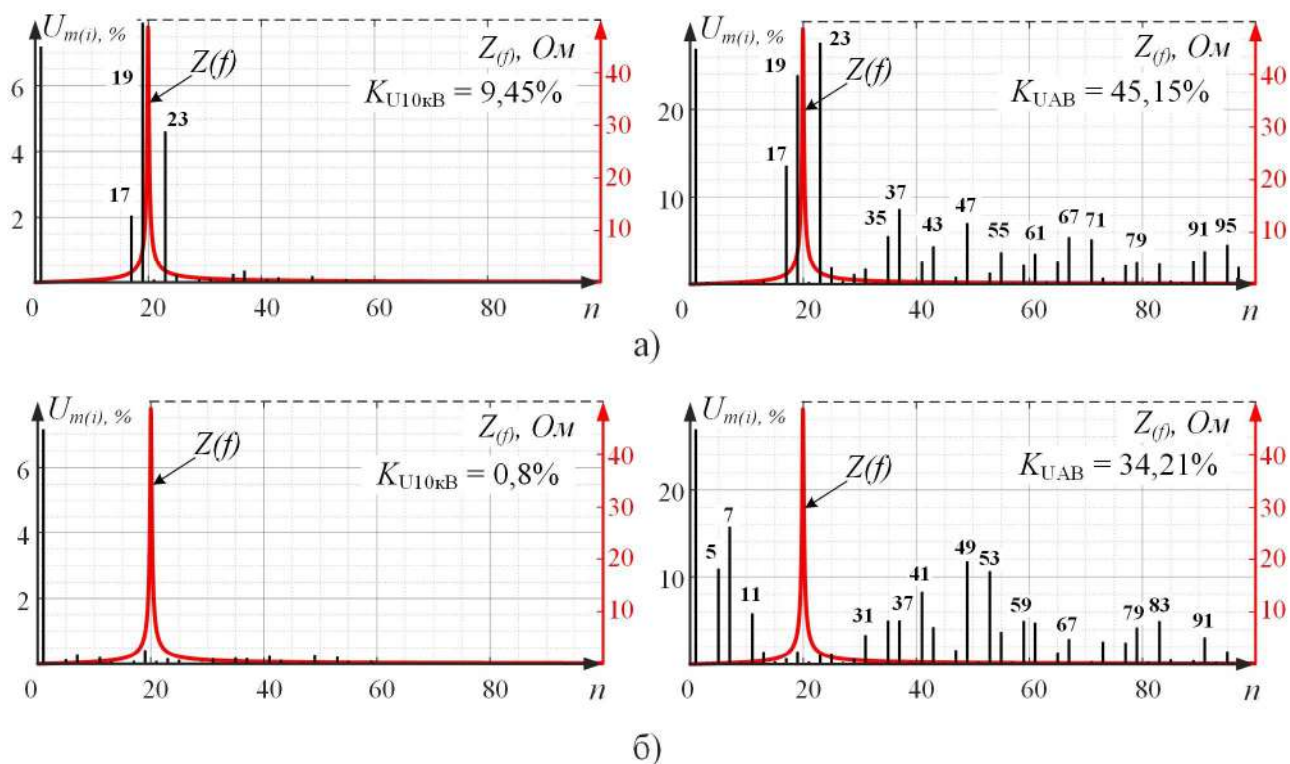


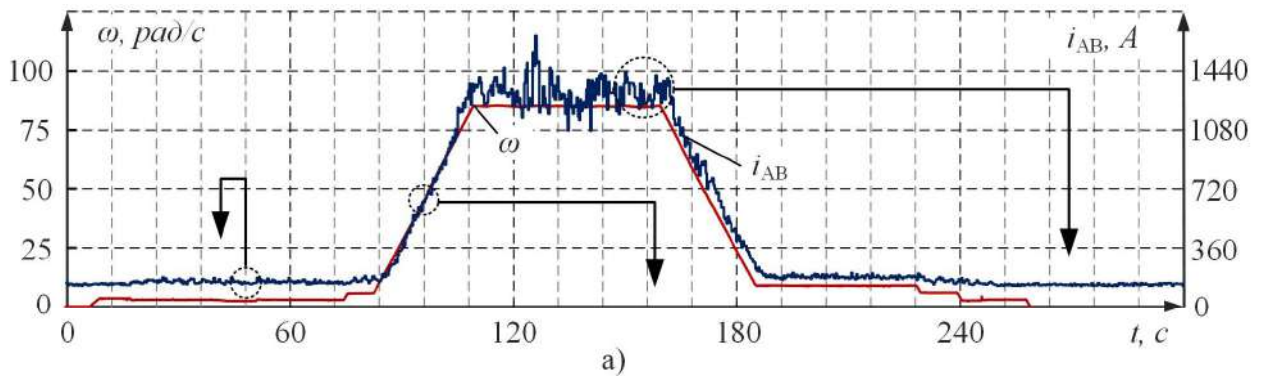
Рисунок 1.11 – Гармонический состав напряжения в точке общего присоединения заводских электроприёмников (слева) и в точке присоединения ПЧ-АВ (справа) при а) использовании ШИМ с УВГ без учёта резонансных явлений в характеристике  $Z(f)$ , б) применении ШИМ с ПВГ с параметрами, рассчитанными в соответствии с методикой Буланова М.В.

В ряде работ [3,37,91,106] предлагаются различные способы расчёта предварительно запрограммированных ШИМ с целью улучшения ЭМС конкретных ПЧ-АВ. Большое количество работ [10,50,80,107-111] посвящено

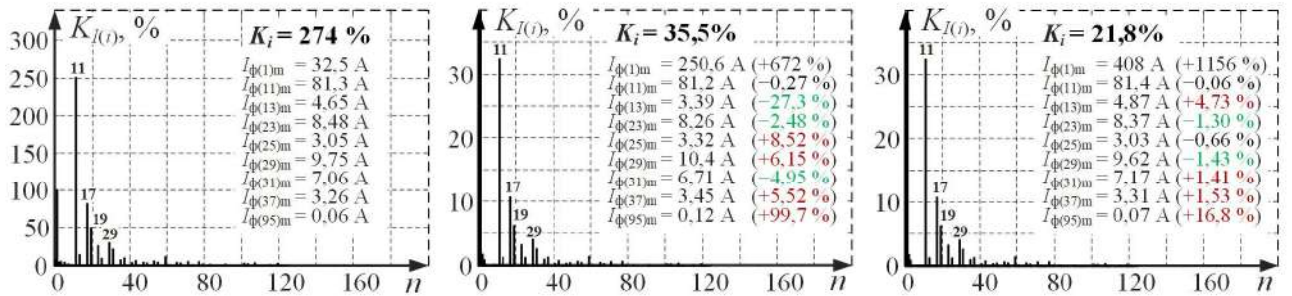
различным гибридным способам ШИМ или частным случаям одной из известных ШИМ для различных силовых схем и схем питания ПЧ.

В работе [14] представлена математическая модель системы прямого управления АВ (direct power control). Результаты имитационного моделирования показали высокое быстродействие контуров регулирования и точность поддержания напряжения в ЗПТ. Различные способы повышения точности и скорости быстродействия контуров регулирования АВ и АИН изложены в работах [40-43,112]. В большей части работ исследования проводились с помощью метода имитационного моделирования в различных программных средах [35,113-116]. В ряде работ [9,11,51,117] были произведены исследования предлагаемых вариантов ШИМ и СУ АВ на лабораторных стендах небольшой мощности (до 100 кВА).

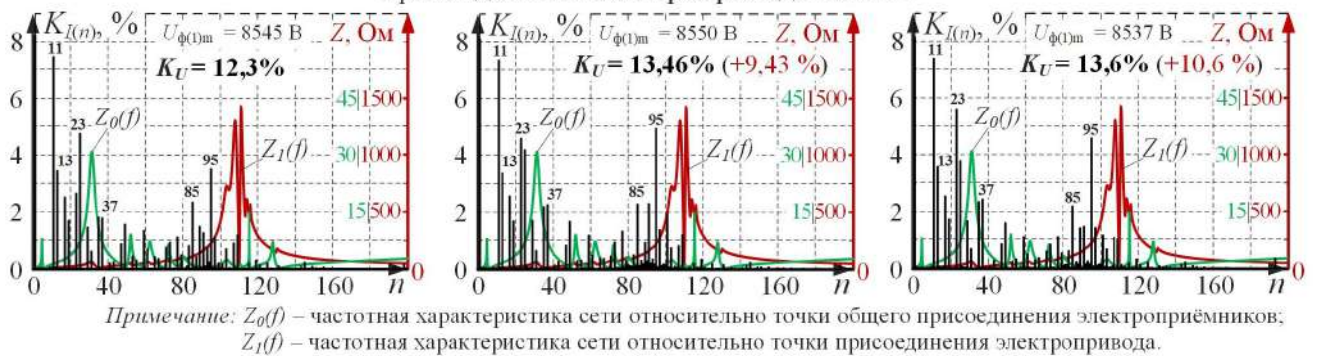
Однако, рассмотренные исследования не учитывают влияние режимов работы электроприводов на базе ПЧ-АВ на показатели качества электроэнергии в системах внутриводского электроснабжения. При изменении нагрузки на электропривод во время различных динамических режимов работы СУ изменяет коэффициент модуляции, 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 внутриводского электроснабжения предприятия особенно при наличии резонансных явлений в частотной характеристике сети. На рисунке 1.12 представлены гистограммы гармонического состава токов главного электропривода клетки 1 стана холодной прокатки ЧерМК ПАО «Северсталь» и напряжения в точке его присоединения при различных режимах работы стана. Значения отдельных гармонических составляющих тока изменяются в широких пределах, что сказывается на показателях качества напряжения системы электроснабжения.



Гармонический состав тока электропривода клетки I стана холодной прокатки



Гармонический состав напряжения и частотная характеристика сети  $Z_1(f)$  для точки присоединения электропривода клетки I



б)

Рисунок 1.12 – Показатели качества электроэнергии (б) при различных режимах работы электропривода клетки стана холодной прокатки (а)

### 1.5. Выводы по главе 1

1. Выполнен анализ силовых схем и схем питания современных главных электроприводов прокатных станов на базе ПЧ-АВ, произведённых различными компаниями (ABB, Siemens, Danieli, Convertteam, Toshiba-Mitsubishi). Для улучшения ЭМС мощных ПЧ-АВ (5-20 МВт) с питающей сетью применяют 6-, 12- и 18-пульсные схемы питания, позволяющие улучшить гармонический состав



потребляемого тока. В качестве полупроводниковых вентилях в большинстве преобразователей применяются IGBT-тиристоры или IGBT-транзисторы.

2. Рассмотрены распространённые в АВ мощных ПЧ алгоритмы ШИМ и реализация систем управления АВ при их использовании. С точки зрения улучшения ПКЭ в системе внутриводского электроснабжения наилучшие результаты обеспечивают методы ШИМ с УВГ и ПВГ. При относительно небольшой частоте коммутации силовых ключей (150-550 Гц) данные методы ШИМ позволяют полностью исключить или снизить величины отдельных высших гармонических составляющих тока преобразователя.

3. Проведен анализ способов улучшения алгоритмов ШИМ и систем управления АВ на основе литературного обзора. Выявлено, что в литературе при рассмотрении влияния ПЧ-АВ на ПКЭ не уделяется должного внимания рассмотрению всех статических и динамических режимов работы электроприводов на базе данных преобразователей. Оптимизация параметров ШИМ проводится, как правило, для статического номинального режима работы электропривода. В этом случае таблица углов переключения силовых ключей ШИМ с УВГ или ПВГ может оказаться неоптимальной для других статических и динамических режимов.

4. Применение только одной таблицы углов переключения в существующих СУ АВ не позволяет производить оптимизацию для различных режимов работы электропривода. Факт наличия данного недостатка в существующих СУ АВ обуславливает актуальность разработки новых систем управления АВ и модифицированных алгоритмов ШИМ, позволяющих использовать оптимальные значения углов переключения полупроводниковых вентилях для каждого статического и динамического режима работы.

Для выполнения указанной цели были сформулированы задачи диссертационного исследования:

- Оценка влияния режимов работы мощных ПЧ-АВ в составе электроприводов прокатных станов на качество электроэнергии во внутриводской распределительной сети 6-35 кВ;



- Разработка усовершенствованной СУ АВ с динамическим выбором оптимальной таблицы углов переключения силовых ключей для текущего режима работы электропривода, обеспечивающей максимально-возможное улучшение качества напряжения в системе электроснабжения предприятия;
- Разработка методики расчёта таблиц углов переключения для усовершенствованной СУ АВ с учётом ограничений по нагреву силовых ключей.
- Разработка имитационной модели предлагаемой СУ АВ с целью проверки её работоспособности и оценки влияния динамической смены таблиц на регулируемые параметры электропривода.
- Проведение теоретических и экспериментальных исследований эффективности усовершенствованной СУ АВ в отношении улучшения показателей качества электроэнергии во внутризаводских сетях среднего напряжения 6-35 кВ.

## ГЛАВА 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РЕЖИМОВ РАБОТЫ МОЩНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ НА БАЗЕ ПЧ-АВ И ИХ ВЛИЯНИЯ НА КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Опыт эксплуатации ПЧ-АВ на отечественных и зарубежных промышленных предприятиях выявил ряд проблем с работой чувствительных электроприёмников. При наличии резонансных явлений в частотной характеристике внутривародской распределительной сети возможно наложение высших гармонических составляющих, генерируемых мощными ПЧ, на резонансную область. В результате происходит существенное искажение напряжения, что приводит к сбоям и выходам из строя различного электрооборудования.

Производители ПЧ заявляют о соответствии их оборудования действующим стандартам в области качества электроэнергии [95-97]. Данные стандарты предполагают расчёт суммарного коэффициента гармонических составляющих  $K_U$  до 40 гармоник (или до 50 гармоник при частоте сети 60 Гц). При использовании алгоритма ШИМ с УВГ с достаточной частотой коммутации силовых вентилях и наличии многопульсной схемы питания АВ существует возможность полностью исключить все гармоники в данном диапазоне, тем самым обеспечить соответствие указанного показателя нормативным значениям. При этом произойдёт значительное усиление оставшихся высших гармонических составляющих. В ряде исследований [118, 119] содержится критика действующих стандартов качества электроэнергии и призывы к необходимости расширения диапазона гармоник при расчёте  $K_U$  до 200-ой.

В большинстве работ, посвящённых анализу ПКЭ в электротехнических комплексах, включающих электропривода на базе ПЧ-АВ, рассматриваются несколько статических режимов работы таких электроприводов. Как правило, анализируется режим холостого хода и работа под нагрузкой. Динамические режимы работы не учитываются. Для проведения корректных исследований влияния ПЧ-АВ на питающую сеть необходим анализ всех статических и динамических режимов работы электропривода.

В данной главе будут рассмотрены результаты экспериментальных исследований режимов работы мощных электроприводов на базе ПЧ-АВ и их влияние 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.

### **2.1. Результаты экспериментальных исследований режимов работы электроприводов стана горячей прокатки 1750 и их влияния на качество напряжения внутриводской системы электроснабжения ЗАО «ММК Metalurji»**

Исследования, проведённые на металлургическом заводе "ММК Metalurji", показали наличие проблем ЭМС мощных электроприводов на базе ПЧ-АВ с внутриводской системой электроснабжения. При запуске стана горячей прокатки 1750 и реверсивного стана холодной прокатки 1750 обнаружилась невозможность работы в штатном режиме электроснабжения, когда электропривода двух станов и второстепенные электроприёмники запитаны от одного понизительного трансформатора 380/34,5 кВ [120]. Низкое качество напряжения в точке общего присоединения потребителей электроэнергии приводило к аварийной работе чувствительных электроприёмников. Поэтому главные электропривода стана горячей прокатки были переведены на питание от резервного трансформатора с отдельной секции главной понизительной подстанции (ГПП) 51EDM, рисунок 2.1. Создание «грязной» секции позволило устранить проблемы с работой чувствительных электроприёмников. Проект системы электроснабжения завода предусматривал наличие одного трансформатора в качестве горячего резерва, благодаря чему осуществлялась возможность проведения ремонтных мероприятий и обслуживания трансформаторов. В связи с этим необходима реализация иного способа обеспечения ЭМС ПЧ с внутриводской системой электроснабжения.

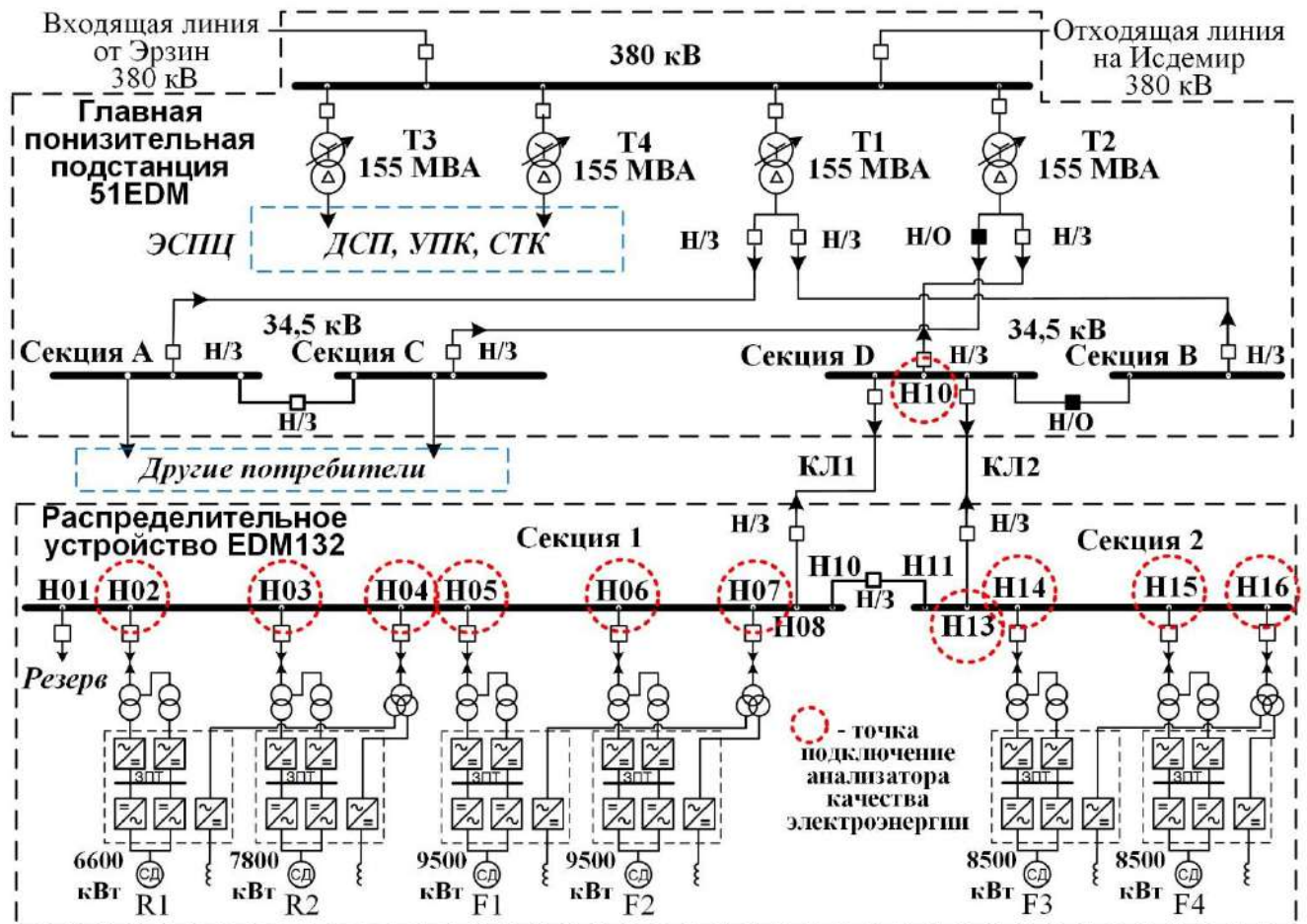


Рисунок 2.1 – Однолинейная схема электроснабжения электроприводов стана горячей прокатки 1750 ЗАО «ММК Metalurji»

Питание металлургического завода «ММК Metalurji» осуществляется по транзитной линии 380 кВ от районной узловой подстанции «Эрзин» на металлургический завод «Исдемир», рисунок 2.1. На главной понизительной подстанции расположены четыре понижающих трансформатора 380/34,5 кВ номинальной мощностью 155 МВА, производства фирмы АВВ. Параметры трансформаторов приведены в приложении А. Трансформаторы Т3 и Т4 осуществляют питание сталеплавильного производства завода. Прокатное производство штатно должно быть запитано от одного трансформатора Т1 или Т2.

Однако, из-за отмеченных ранее проблем главные электропривода стана горячей прокатки получают питание от трансформатора Т2. Для этого секция D ЗРУ-34,5 кВ 51EDM была отключена от параллельной работы с секцией В и запитана от трансформатора Т2. Секция В ЗРУ-34,5 кВ 51EDM подключена к трансформатору Т1. От секции D ЗРУ-34,5 кВ ГПП 51EDM получают питание

секции 1 и 2 распределительного устройства 132EDM по двум кабельным линиям КЛ1 и КЛ2. Обе секции включены на параллельную работу.

От секции 1 распределительного устройства 132EDM запитаны электроприводы двух черновых клетей R1 и R2 (от англ. Roughing Stand – черновая клеть), первых двух чистовых клетей F1, F2 (от англ. Finishing Stand – чистовая клеть) и тиристорные возбуждители синхронных двигателей. От секции 2 получают питание два электропривода чистовых клетей F3, F4 и их возбуждители. Электропривода прокатного стана реализованы на базе ПЧ-АВ серии ACS6000 фирмы АВВ. Параметры преобразователей, трансформаторов и синхронных двигателей электроприводов приведены в приложении А.

Каждый преобразователь состоит из двух АИН и двух АВ с общим звеном постоянного тока. Применение двух трансформаторов с различными группами соединения вторичных обмоток, позволило реализовать 12-пульсную схему питания. Как уже было отмечено в главе 1, при такой схеме питания в гармоническом спектре потребляемого электроприводом тока присутствуют только высшие гармонические составляющие с порядковыми номерами  $12n \pm 1$ , где  $n = 1, 2, 3, \dots$

Для оценки ПКЭ в системе внутризаводского электроснабжения применялись следующие измерительные комплексы: 1) анализатор качества напряжения Fluke 435 с токовыми клещами Fluke i5s (частота дискретизации до 5 кГц); 2) анализатор качества электроэнергии ELSPEC G4430 (частота дискретизации для каждого канала: напряжение – 1024 измерений/цикл, ток – 512 измерений/цикл); 3) сервер быстрых архивов ИВА (с периодом дискретизации меньше 10 мс).

На рисунке 2.2 показан процесс проведения экспериментальных исследований качества электроэнергии во внутризаводской распределительной сети 34,5 кВ металлургического завода ЗАО “ММК Metalurji”. Для оценки степени влияния ПЧ-АВ на ПКЭ и анализа текущих режимов работы внутризаводской системы электроснабжения с помощью указанных измерительных комплексов были записаны мгновенные значения напряжений и токов на различных участках



а)

б)

Рисунок 2.2 – Проведение экспериментальных исследований ПКЭ ЗРУ-34,5 кВ

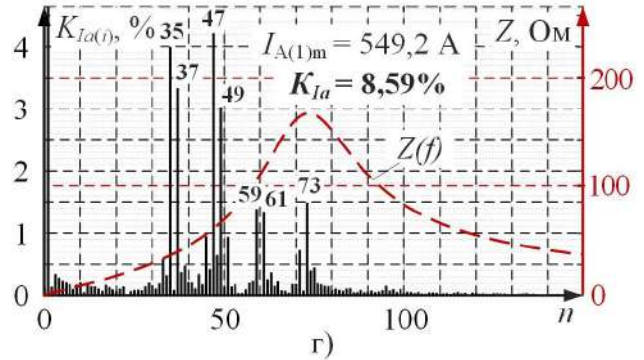
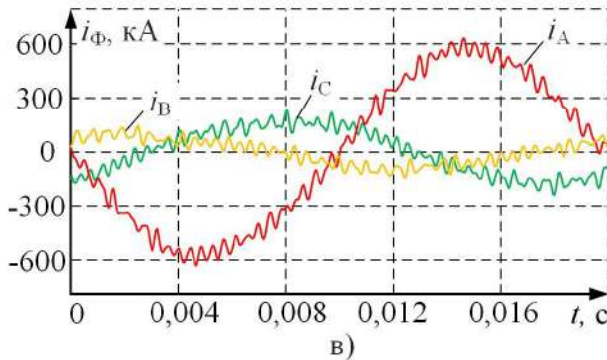
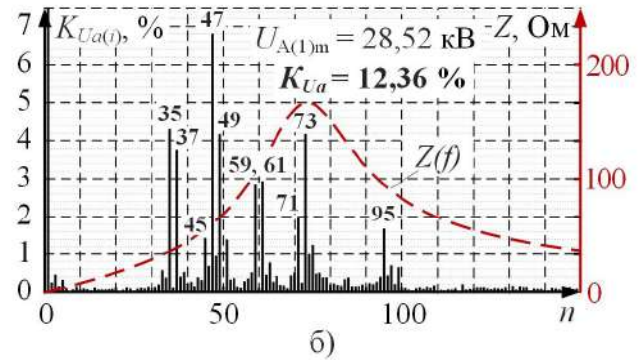
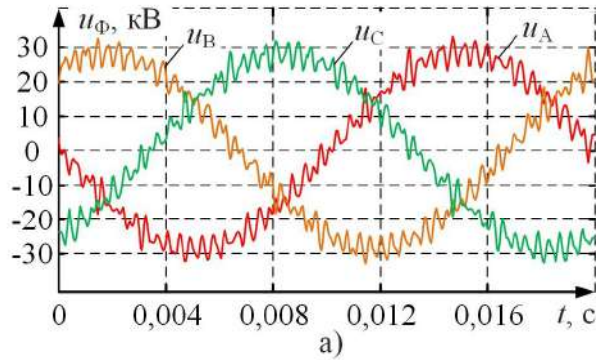
а) ГПП 51EDM, б) РП 132EDM

внутризаводской сети. Точки подключения измерительных комплексов отмечены на рисунке 2.1. Сигналы с измерительных обмоток трансформаторов напряжения фидеров подавались на клеммы цепей измерения напряжения анализаторов качества электроэнергии. Запись мгновенных значений токов трансформаторов тока цепей защиты фидеров производилась с помощью токовых клещей. Из-за аппаратных ограничений применяемого оборудования расчёт высших гармонических составляющих записанных напряжений и токов проводился до 150 гармоники.

На рисунке 2.3 показаны измеренные мгновенные значений напряжений и токов ячейки Н10 секции D ЗРУ-34,5 кВ ГПП 51EDM при работе электроприводов стана под нагрузкой и на холостом ходу. Во время работы стана горячей прокатки в гармоническом спектре напряжения точки общего присоединения на значимом уровне присутствуют гармоники с номерами 35, 37, 47, 49, 59, 61, 71, 73 и 95, рисунок 2.3 б). Величина коэффициента  $K_U$  составила 12,36, 12,73, 12,59 % для фаз А, В, С соответственно. Сильные искажения питающего напряжения являются причиной аварийного функционирования чувствительных электроприёмников, при их параллельной работе секций ГПП от одного понизительного



Секция D ЗРУ-34,5 кВ ГПП 51EDM (ячейка Н10) под нагрузкой



Секция D ЗРУ-34,5 кВ ГПП 51EDM (ячейка Н10) без нагрузки

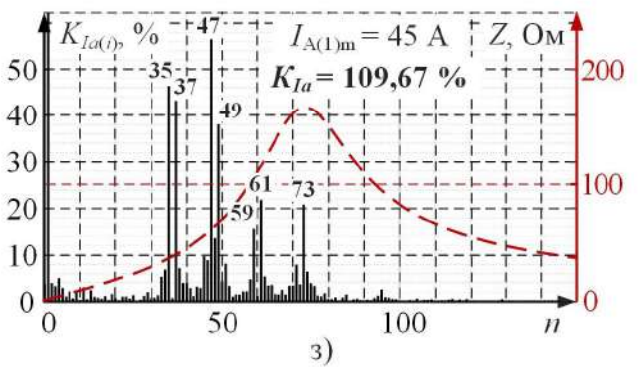
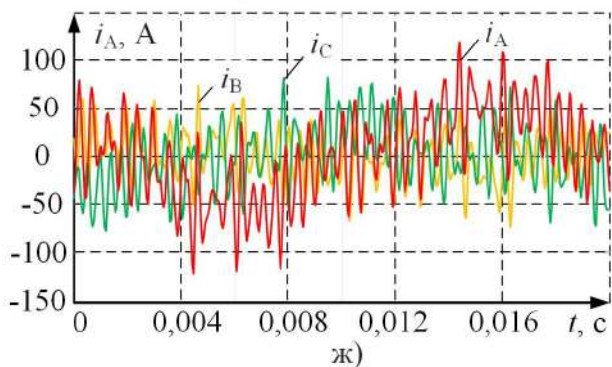
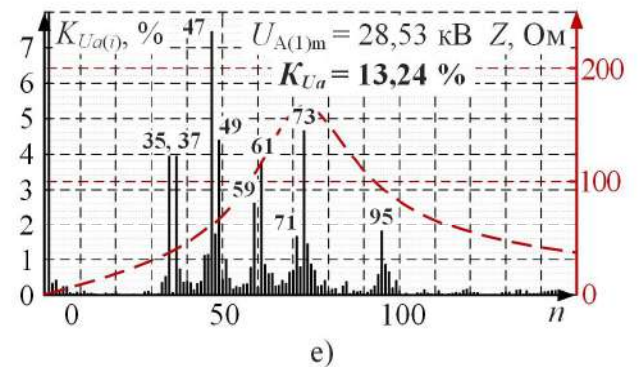
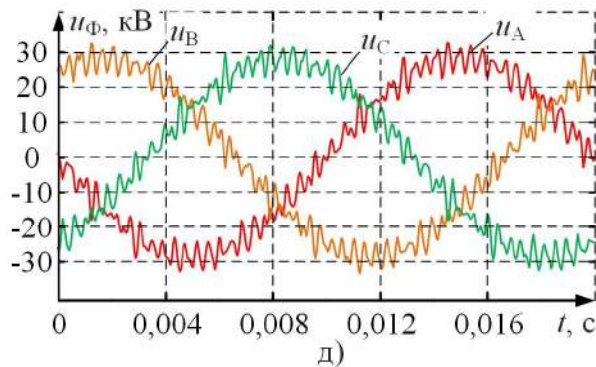


Рисунок 2.3 – Измеренные мгновенные значения напряжений ЗРУ-34,5 кВ а,д) секции D ГПП 51EDM и в,ж) токов ячейки Н10, питающего секцию D ГПП, и б,г,е,з) их гармонический состав при работе прокатного стана: а,в) под нагрузкой и д,ж) без металла в клетях

трансформатора. Также на указанном рисунке показана частотная характеристика сети 34,5 кВ относительно секции D 51EDM. Резонансная область расположена в частотном диапазоне  $f - 2350 \dots 5050$  Гц ( $n = 47 \dots 111$ ).

Ток ячейки H10, питающей секцию D, характеризуется значительной асимметрией при прокатке металла станом, рисунок 2.3 в). Это вызвано некорректной работой блоков ФАПЧ ПЧ-AB или плохой настройкой контуров регулирования СУ AB электроприводов стана горячей прокатки. Величина первой гармоники тока фазы A в момент измерения составила 383 А, величина  $K_I = 8,59$  %. В гармоническом спектре тока, рисунок 2.3 г), на значимом уровне присутствуют гармоники с теми же номерами, что и в гармоническом спектре напряжения.

На рисунке 2.3 д-з) приведены результаты измерений при работе электроприводов стана на холостом ходу. В данном режиме на значимом уровне в гармонических спектрах напряжения и тока присутствуют гармоники с теми же порядковыми номерами – рисунок 2.3 е,з), как и в предыдущем рассмотренном случае. Величина  $K_U$  увеличилась и составила 13,24 % для напряжения фазы A. Значение  $K_U$  для напряжений фаз B и C равнялось 13,27 и 13,22 % соответственно. Из-за низкой величины первой гармоники тока при работе электроприводов стана горячей прокатки на холостом ходу значение коэффициента  $K_I$  для тока ячейки H10 увеличилось на порядок по сравнению с режимом работы электроприводов стана при прокатке металла и составило 109,7 %.

Затем были записаны осциллограммы фазных напряжений работающих параллельно шин секций 1 и 2 распределительного устройства 34,5 кВ 132EDM при работе электроприводов стана под нагрузкой и на холостом ходу, рисунок 2.4 а,в). Гармонический спектр записанных сигналов представлен на рисунке 2.4 б,г) соответственно. Учитывая, относительно небольшое значение активно-индуктивного сопротивления двух кабельных линий, питающих параллельно работающие секции 1 и 2 ЗРУ-34,5 кВ 132EDM, результаты измерений схожи с результатами для секции D ГПП.



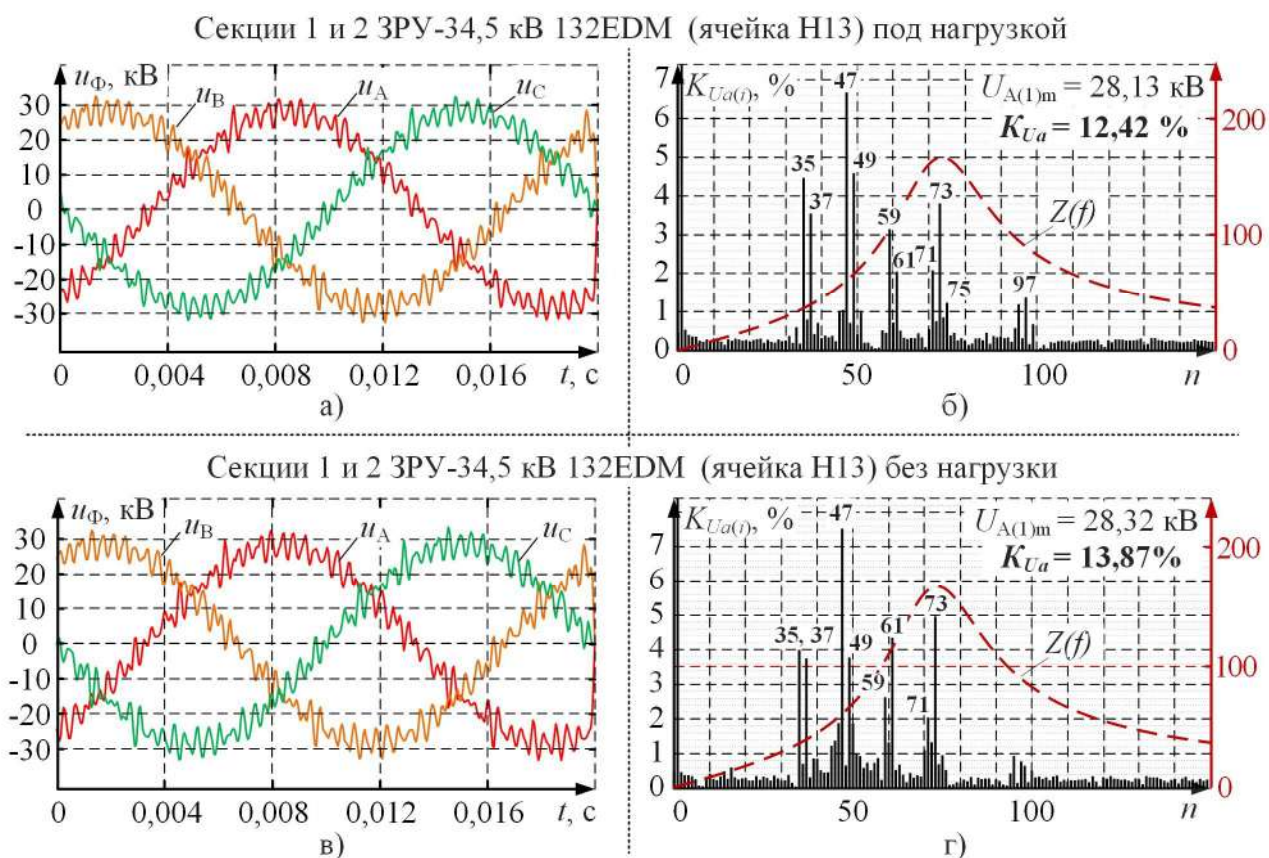


Рисунок 2.4 - Измеренные мгновенные значения напряжений ЗРУ-34,5 кВ а,в) секций 1 и 2 132EDM, питающего секцию главные электропривода стана, и б,г) их гармонический состав при работе прокатного стана: а) под нагрузкой, в) без металла в клетях

Для анализа применяемых в СУ АВ алгоритмов ШИМ и определения их параметров были записаны мгновенные значения токов ячеек Н02, Н03, Н05, Н06, Н14, Н15, питающих электропривода стана. Измерения производились для двух режимов работы: при прокатке металла станом и при отсутствии металла в клетях. Необходимо указать, что из-за технических ограничений применяемых измерительных комплексов запись сигналов производилась в различные моменты времени для каждого электропривода. Результаты экспериментальных исследований и гармонических спектр записанных сигналов представлены на рисунках 2.5 – 2.7.

Как уже было отмечено в главе 1, в гармоническом составе потребляемого электроприводом тока при использовании 12-пульсной схемы питания содержатся высшие гармоники с номерами  $12n \pm 1$ , где  $n = 1, 2, 3, \dots$ . В гармонических спектрах

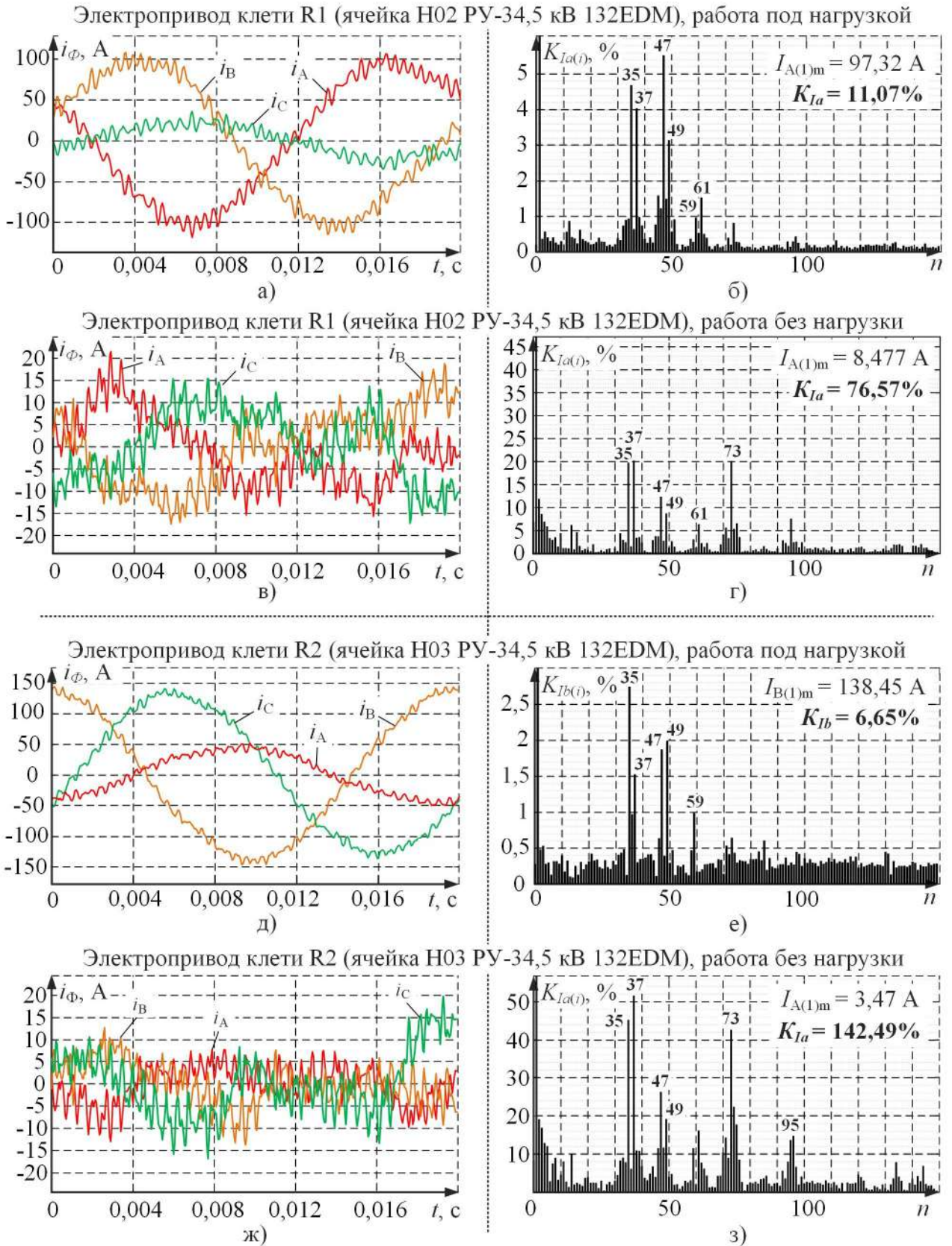


Рисунок 2.5 – Измеренные мгновенные значения токов электродвигателей клеток а,в) R1 и д,ж) R2 при работе а,д) под нагрузкой, в,ж) без нагрузки и б,г,е,з) их гармонический состав



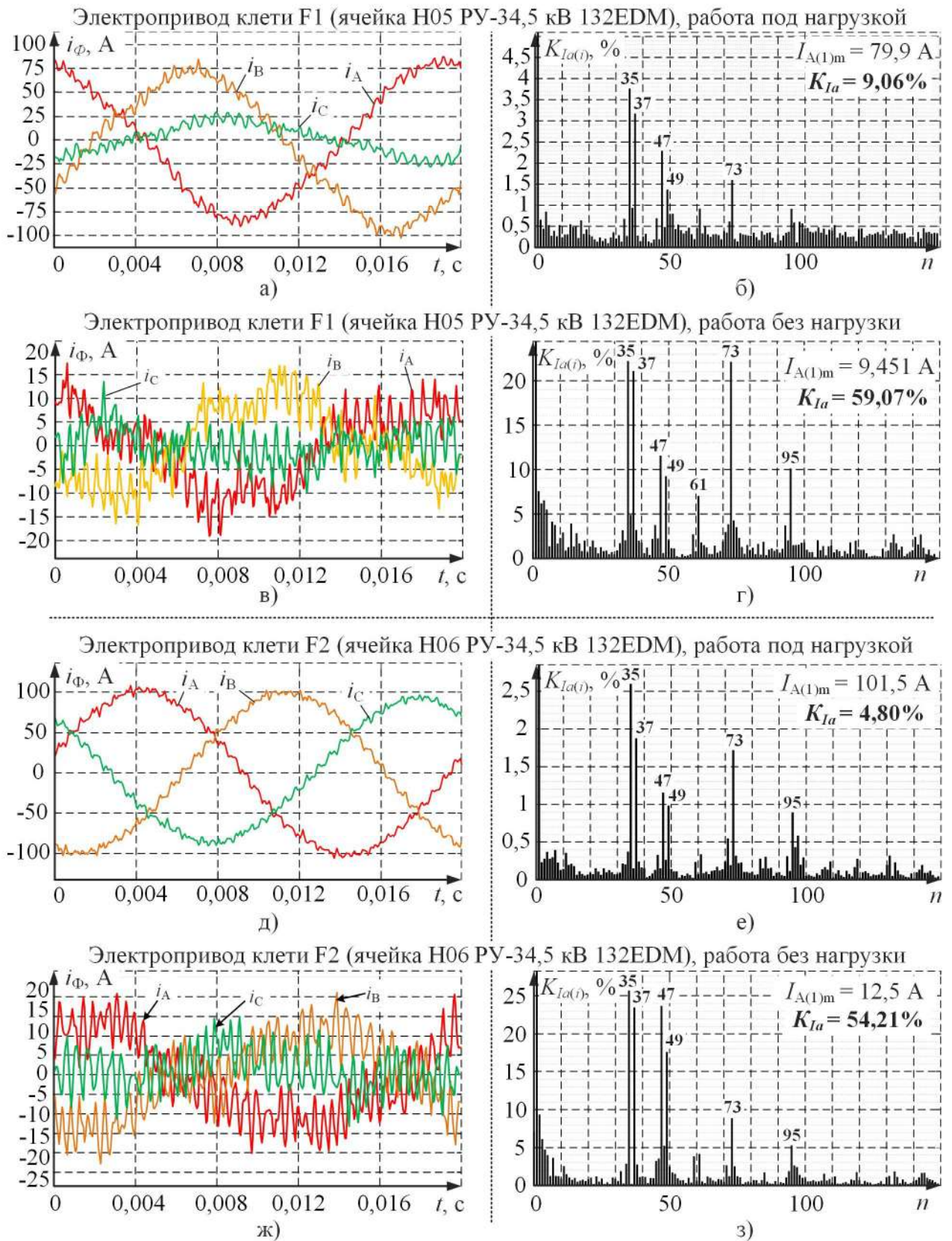


Рисунок 2.6 – Измеренные мгновенные значения токов электродвигателей клеток а,в) F1 и д,ж) F2 при работе а,д) под нагрузкой, в,ж) без нагрузки и б,г,е,з) их гармонический состав

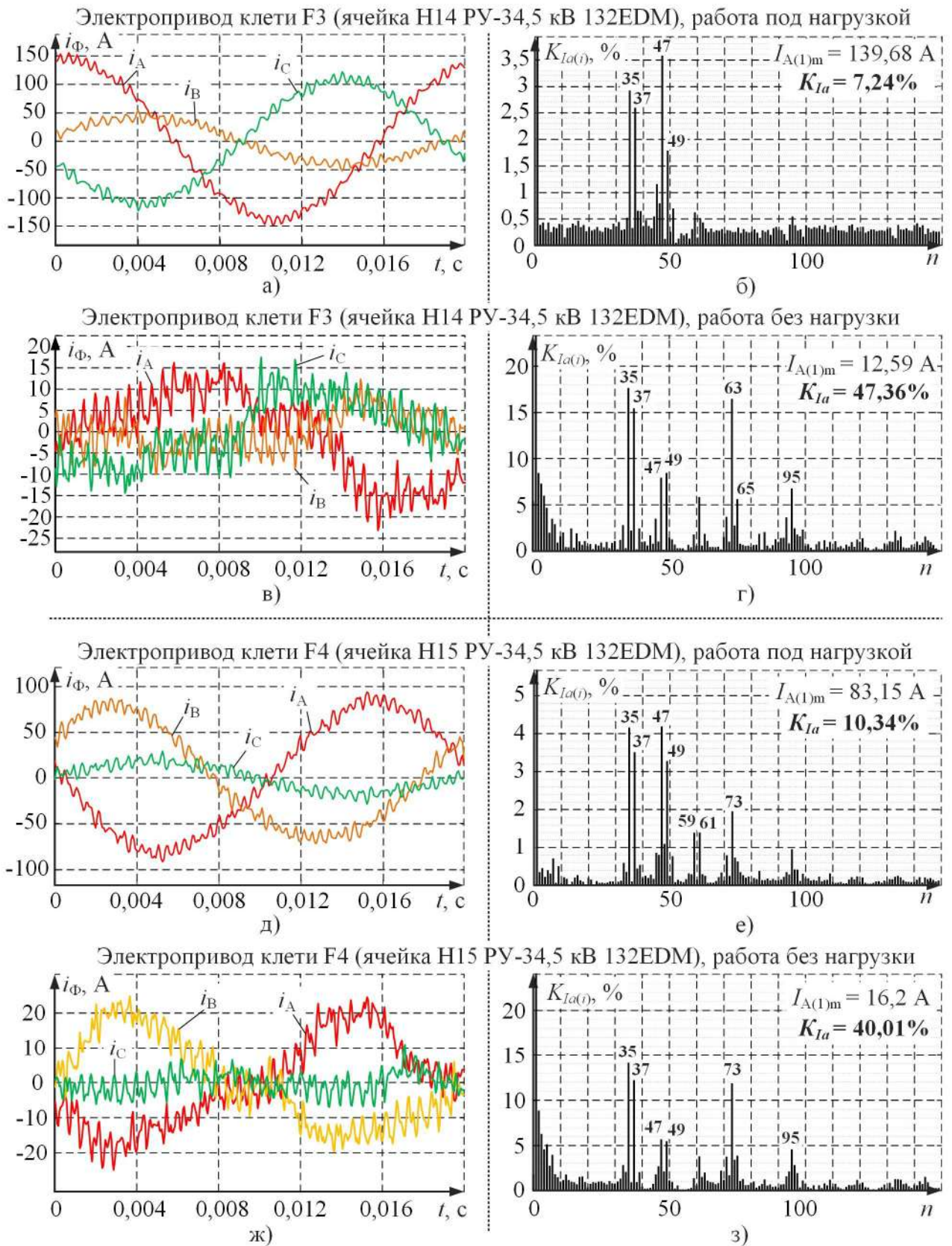


Рисунок 2.7 – Измеренные мгновенные значения токов электроприводов клеток а,в) F3 и д,ж) F4 при работе а,д) под нагрузкой, в,ж) без нагрузки и б,г,е,з) их гармонический состав



записанных токов отсутствуют составляющие с номерами 11, 13, 23, 25. Анализ файлов параметризации АВ позволил установить частоту коммутации силовых ключей – 250 Гц или 5 переключений за 1/4 периода. На основании этого можно сделать вывод об использовании ШИМ с УВГ с 5 переключениями за 1/4 периода с удалением 11, 13, 23, 25 гармоник.

При работе электроприводов под нагрузкой на значимом уровне присутствуют гармоники с номерами 35, 37, 47, 49. При работе на холостом ходу – кроме указанных ещё и 73, 95.

В случае использования ШИМ с УВГ происходит усиление следующих оставшихся в гармоническом спектре составляющих. Т.е. в данном случае при удалении гармоник с 11 по 25 значительно усиливаются гармоники с номерами 35, 37, 47, 49. Импеданс сети на этих частотах больше, чем на частотах удаляемых гармоник. Следовательно, алгоритм ШИМ с УВГ с указанными параметрами не является оптимальным для данного электротехнического комплекса.

Оценка степени влияния электроприводов стана горячей прокатки на базе ПЧ-АВ на качество напряжения в системе внутризаводского электроснабжения при рассмотрении только двух отдельных режимов работы стана является неполной. Также в связи с поставленной задачей разработки усовершенствованной СУ АВ необходимо рассмотреть режимы работы электроприводов стана более детально. Для этого была произведена запись основных параметров электроприводов за весь цикл работы прокатного стана, рисунок 2.8. Полученные графики важны с точки зрения величин нагрузок АВ, их характера и могут быть использованы в последующих главах данной работы при разработке способов улучшения ПКЭ и проведения имитационного моделирования.

На рисунке 2.8 г) показано значение коэффициента  $K_U$  для секции D ЗРУ-34,5 кВ ГПП 51EDM за весь цикл работы стана горячей прокатки. Видно, что величина  $K_U$  остаётся практически неизменной при статических режимах работы электроприводов стана и сильно изменяется при динамических. Заход сляба в клетки стана вызывает ударное увеличение нагрузки на главные электропривода, что

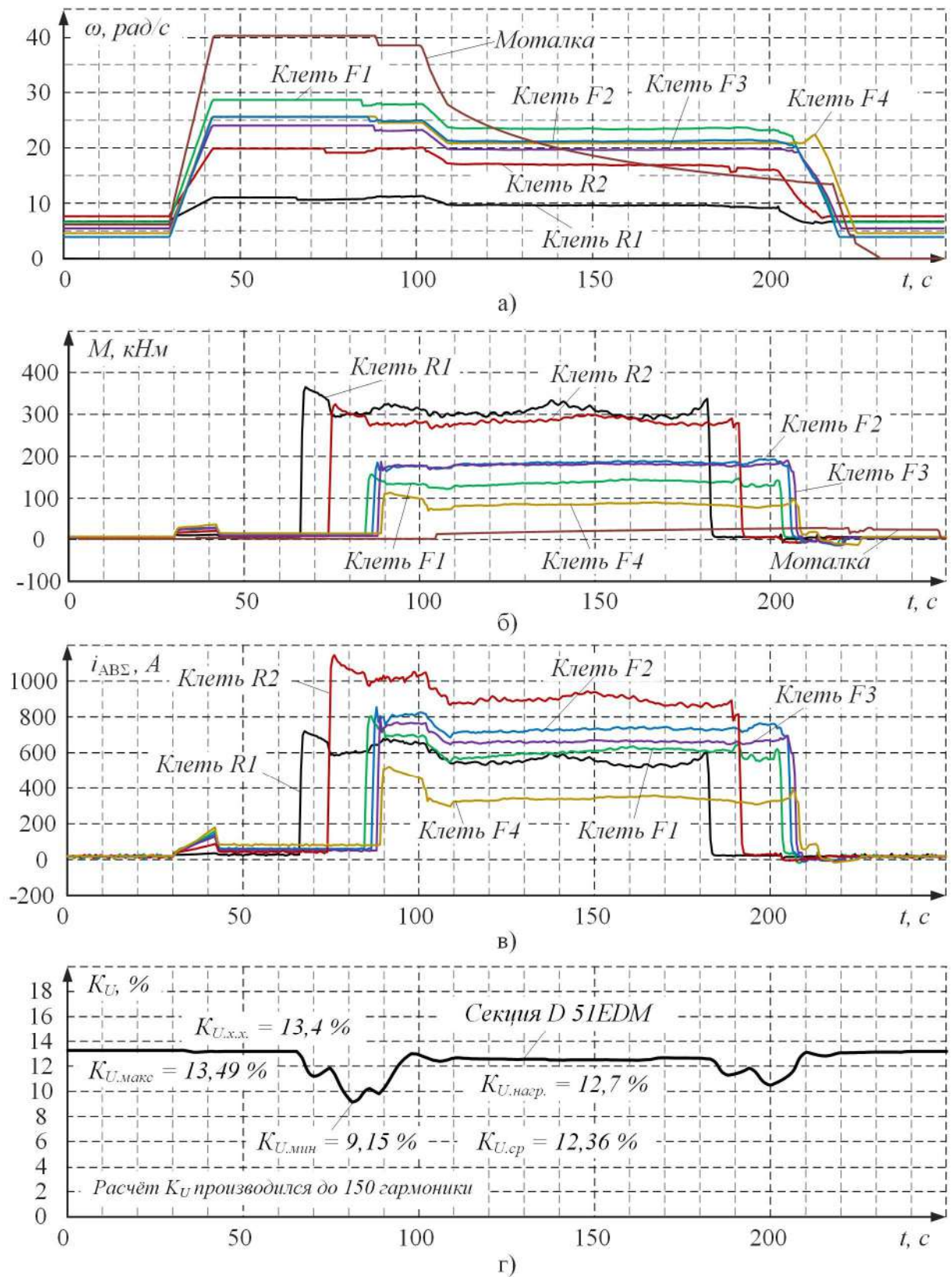


Рисунок 2.8 - Записанные мгновенные значения а) угловых скоростей, б) моментов синхронных двигателей, в) суммарных токов АВ ПЧ главных электроприводов стана горячей прокатки, г) коэффициента  $K_U$  для секции D ЗРУ-34,5 кВ ГПП 51EDM ЗАО «ММК Metalurji» за цикл работы стана

приводит к резким броскам токов АВ. После прохода листа через клеть происходит обратный процесс. В эти моменты из-за наличия транспортного запаздывания часть электроприводов работает с полной нагрузкой, а часть на холостом ходу. Обеспечения требуемой величины тока АВ осуществляется СУ с помощью изменения коэффициента модуляции, что приводит к использованию другого набора углов переключения силовых ключей. Как было отмечено в главе 1, при их расчётах в алгоритме ШИМ с УВГ контролируются только величины составляющих, подлежащих удалению. Работа части АВ с одними значениями углов переключения, а части с другими, приводит к возникновению эффекта активной фильтрации, что проявляется в снижении величины коэффициента  $K_U$  за счёт сложения некоторых высших гармонических составляющих, находящихся в противофазе.

Для удобства анализа все основные результаты измерений показателей качества электроэнергии при проведении экспериментальных исследований на ЗАО «ММК Metalurji» представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Результаты экспериментальных исследований качества электроэнергии в системе внутриводского электроснабжения ЗАО «ММК Metalurji»

Точка измерения	Параметр	При работе электроприводов под нагрузкой	При работе электроприводов на холостом ходу
Ячейка Н10 секции D ЗРУ-34,5 кВ ГПП 51EDM	$U_{A(l)m}$ , кВ	28,52	28,53
	$K_U$ , %	12,36	13,24
	Значимые гармоники	35, 37, 47, 49, 59, 61, 71, 73, 95	35, 37, 47, 49, 59, 61, 71, 73, 95
	$I_{A(l)m}$ , А	549,2	45,0
	$K_I$ , %	8,59	109,67
	Значимые гармоники	35, 37, 47, 49, 59, 61, 73	35, 37, 47, 49, 59, 61, 73
Ячейка Н13 секция 2 ЗРУ-34,5 кВ 132EDM	$U_{A(l)m}$ , кВ	28,13	28,32
	$K_U$ , %	12,42	13,87
	Значимые гармоники	35, 37, 47, 49, 59, 61, 71, 73, 95, 97	35, 37, 47, 49, 59, 61, 71, 73

Точка измерения	Параметр	При работе электроприводов под нагрузкой	При работе электроприводов на холостом ходу
Ячейка Н02 секция 1 ЗРУ-34,5 кВ 132EDM (ЭП клетки R1)	$I_{A(1)m}$ , А	97,3	8,48
	$K_I$ , %	11,07	76,57
	Значимые гармоники	35, 37, 47, 49, 59, 61, 73	35, 37, 47, 49, 61, 71, 73, 95
Ячейка Н03 секция 1 ЗРУ-34,5 кВ 132EDM (ЭП клетки R2)	$I_{A(1)m}$ , А	138,5	3,47
	$K_I$ , %	6,65	142,5
	Значимые гармоники	35, 37, 47, 49, 59, 61, 73, 95	35, 37, 47, 49, 59, 61, 71, 73, 95
Ячейка Н05 секция 1 ЗРУ-34,5 кВ 132EDM (ЭП клетки F1)	$I_{A(1)m}$ , А	79,9	9,45
	$K_I$ , %	9,06	59,1
	Значимые гармоники	35, 37, 47, 49, 61, 73, 95	35, 37, 47, 49, 59, 61, 71, 73, 95, 97
Ячейка Н06 секция 1 ЗРУ-34,5 кВ 132EDM (ЭП клетки F2)	$I_{A(1)m}$ , А	101,5	12,6
	$K_I$ , %	4,80	54,3
	Значимые гармоники	35, 37, 47, 49, 73, 95	35, 37, 47, 49, 59, 61, 73, 95
Ячейка Н14 секция 1 ЗРУ-34,5 кВ 132EDM (ЭП клетки F3)	$I_{A(1)m}$ , А	139,68	12,59
	$K_I$ , %	7,24	47,36
	Значимые гармоники	35, 37, 47, 49	35, 37, 47, 49, 51, 61, 63, 65, 95
Ячейка Н15 секция 1 ЗРУ-34,5 кВ 132EDM (ЭП клетки F4)	$I_{A(1)m}$ , А	83,15	16,2
	$K_I$ , %	10,34	40,01
	Значимые гармоники	35, 37, 47, 49, 59, 61, 73, 95	35, 37, 47, 49, 73, 95

## 2.2. Результаты экспериментальных исследований режимов работы электроприводов стана холодной прокатки и их влияния на качество напряжения внутриводской системы электроснабжения ЧерМК ПАО «Северсталь»

Аналогичные исследования также были проведены на Череповецком металлургическом комбинате, входящим в группу ПАО «Северсталь» [121]. После реконструкции четырёхклетьевого стана холодной прокатки на данном предприятии столкнулись с многочисленными проблемами с работой



чувствительных электроприёмников, получающих питание от сети 10 кВ района главной понизительной подстанции ГПП-2. Фиксировались случаи аварийного отключения мощных источников бесперебойного питания (ИБП) контроллеров серверов АНГЦ, возникающие по причине выпадения преобразователей ИБП из синхронизма с питающей сетью. Кроме того, было отмечено повышение энергопотребления на 15-20% у систем освещения цехов на газоразрядных лампах. Также были замечены несколько случаев выхода из строя муфт кабельных линий 10 кВ, конденсаторных батарей УКРМ, конденсаторов защитных РС цепей выпрямительных устройств.

В ходе реконструкции были модернизированы главные электропривода стана – установлены 5 мощных ПЧ-АВ серии ACS6000 фирмы АВВ и синхронные электродвигатели [122], рисунок 2.9. Электропривода клетки 1 и моталки выполнены по 6-пульсной схеме питания, остальные – по 12-пульсной. Питание осуществляется с секций распределительной подстанции РП-19, которая в свою очередь запитана от секций ГПП-2 по двум кабельным линиям. Особенностью

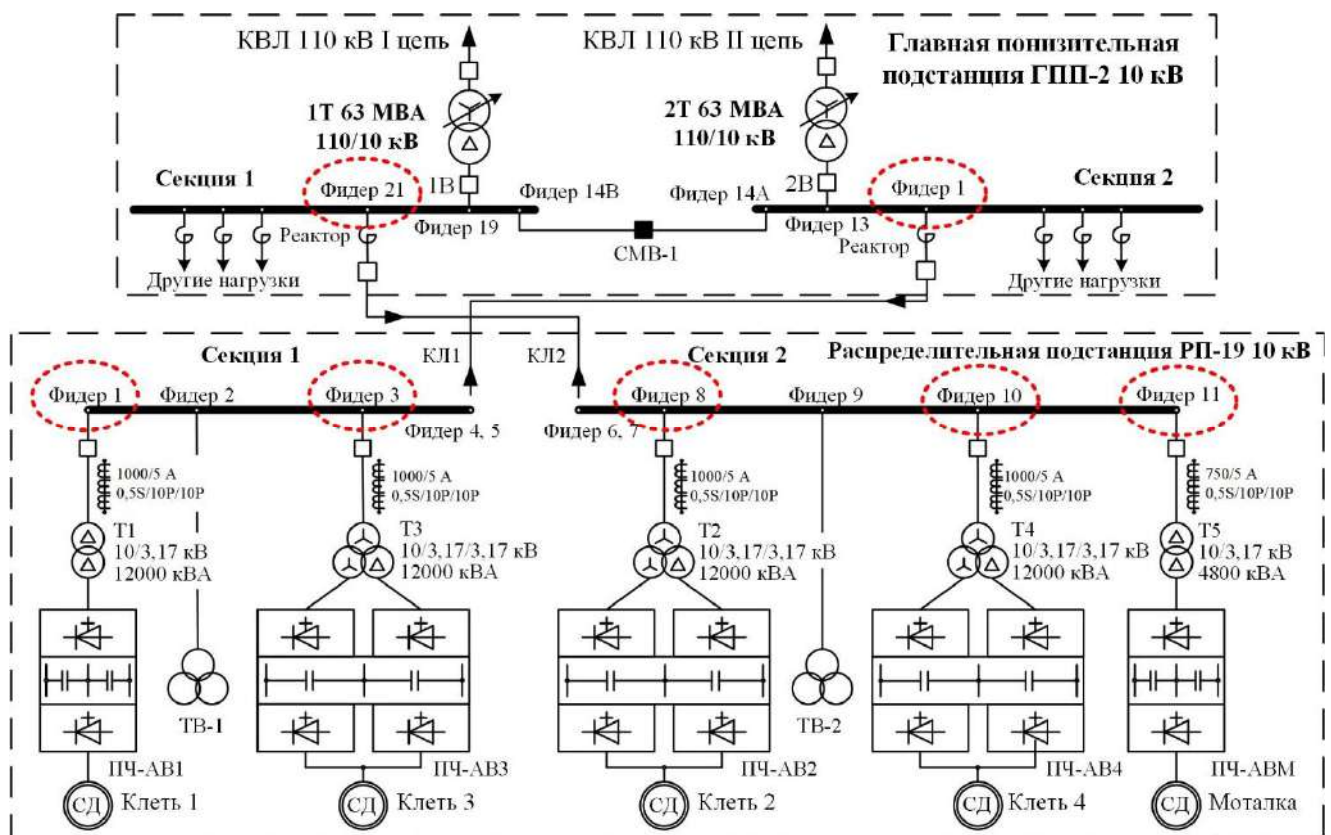


Рисунок 2.9 - Однолинейная схема электроснабжения электроприводов стана холодной прокатки ЧерМК ПАО «Северсталь»

данной системы электроснабжения является наличие реакторов во всех фидерах ГПП-2. Секция 1 и секция 2 ГПП-2 получают питание от двух понизительных трансформаторов 1Т и 2Т 110/10 кВ мощностью 64 МВА. Параметры электроприводов, понизительных трансформаторов, кабельных линий и реакторов приведены в приложении Б.

Для осуществления экспериментальных исследований ПКЭ были применены 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).

Сначала были проведены экспериментальные исследования показателей качества напряжения различных участков распределительной сети 10 кВ района ГПП-2. На рисунке 2.10 представлены мгновенные значения линейных напряжений на секциях ЗРУ-10 кВ ГПП-2 и РП-19 при питании секций ГПП-2 от двух понизительных трансформаторов 110/10 кВ, фазное напряжение при параллельной работе секций 1 и 2 ГПП-2 от одного понизительного трансформатора и гармонический спектр для каждого измеренного сигнала. Также для всех рассматриваемых участков системы электроснабжения были получены частотные характеристики сети, рисунок 2.10 б,г,е,з,к).

Сложный характер частотной характеристики сети относительно секций ГПП-2 обусловлен применением токоограничивающих реакторов с индуктивными сопротивлениями  $X_{P.ФАЗ} = 0,29-0,35$  Ом. Основной резонанс  $f_{PE3} = 1450-2100$  Гц вызван взаимным влиянием индуктивностей понизительных трансформаторов 110/10 кВ и суммарной ёмкостью протяжённых кабельных линий. Множественные дополнительные резонансы в более высоком частотном диапазоне – индуктивностью токоограничивающих реакторов в фидерах ГПП-2 с ёмкостью отдельных кабельных линий. Следует отметить, что амплитуды дополнительных резонансов в несколько раз ниже, чем у основного резонансного пика. Это

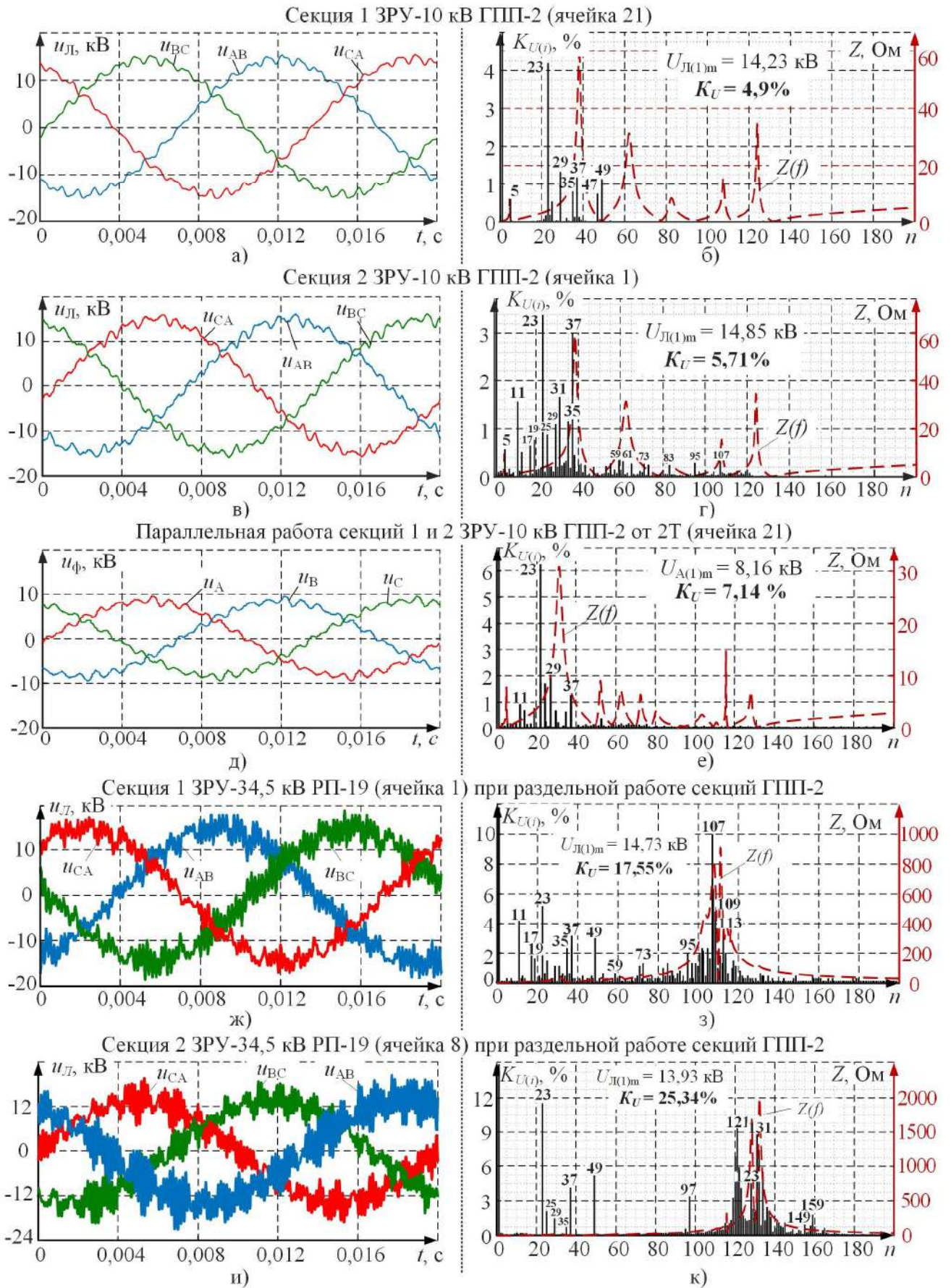


Рисунок 2.10 – Мгновенные значения напряжений различных участков системы внутризаводского электроснабжения ЧерМК и их гармонический состав

обуславливает незначительное усиление гармонических составляющих высокого порядка, генерируемых ПЧ-АВ в составе главных электроприводов стана холодной прокатки. Можно выделить следующие значимые гармоники, попадающие в область основного резонанса и оказывающие существенное влияние на качество напряжения на секциях ЗРУ-10 кВ ГПП-2: 23, 25, 29, 31, 35, 37.

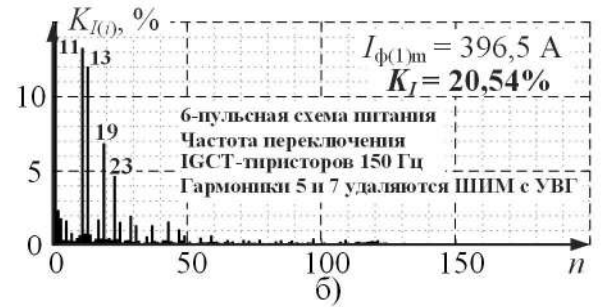
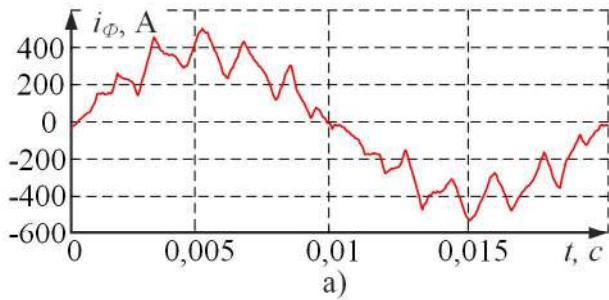
Иной характер частотной характеристики сети свойственен для секций 1 и 2 ЗРУ-10 кВ РП-19. В характеристиках  $Z(f)$  присутствует только одна область подъема импеданса сети, расположенная в диапазоне частот  $f_{PE3} = 5050-5650$  Гц для секции 1 и  $f_{PE3} = 6250-6750$  Гц для секции 2, рисунок 2.10 з,к). Амплитуды резонансных пиков составляют от 800 до 2000 Ом. В результате происходит усиление незначительных по амплитуде гармонических составляющих высокого порядка, генерируемых ПЧ-АВ, и сильного ухудшения качества напряжения на секциях РП-19, рисунок 2.10 ж,и). В момент проведения исследований величина  $K_U$  для секции 1 составила 17,55 %, для секции 2 – 25,34 %. Доминирующими гармониками с амплитудой выше 4% относительно первой являются: 11, 23, 107, 109 для секции 1 и 23, 37, 49, 121, 123, 131 для секции 2.

С целью определения используемых алгоритмов ШИМ в СУ АВ и их настроек были записаны осциллограммы токов главных электроприводов при прокатке листа станом, рисунок 2.11, и при работе на холостом ходу, рисунок 2.12. В АВ преобразователей серии ACS6000 фирмы АВВ используется алгоритм ШИМ с УВГ. Все АВ ПЧ имеют различные настройки ШИМ, кроме электроприводов клеток 2 и 4. В случае АВ электроприводов клетки 1 и моталки данный факт можно объяснить применением 6-пульсной схемы питания и различной мощностью преобразователей. Использование в АВ клетки 3 отличных настроек от клеток 2 и 4 вызывает вопросы к качеству проведения пуско-наладочных работ.

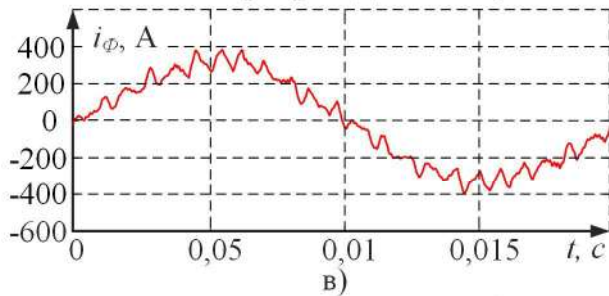
В гармонических спектрах токов главных электроприводов стана присутствуют гармоники, попадающие в резонансную область частотной характеристики сети относительно секций ЗРУ-10 кВ ГПП-2. Среди них стоит отметить 23 гармонику, характерную для всех случаев. Из этого можно сделать вывод, что настройка алгоритмов ШИМ СУ АВ с учётом резонансных явлений в



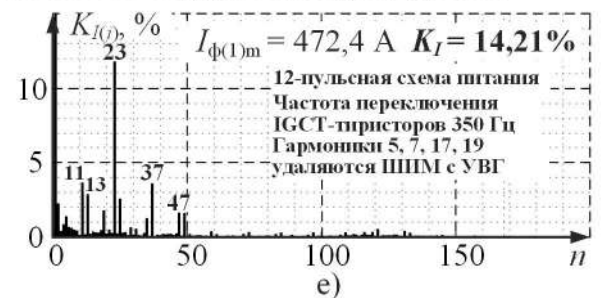
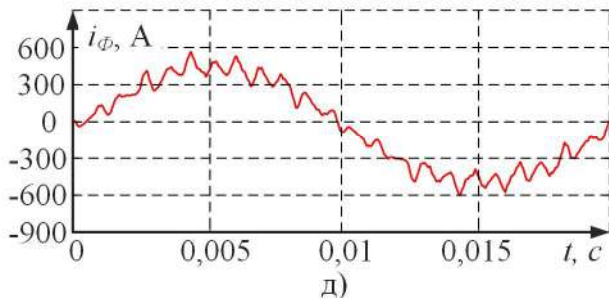
Электропривод клетки 1 (ячейка 1 ЗРУ-10 кВ РП-19), работа под нагрузкой



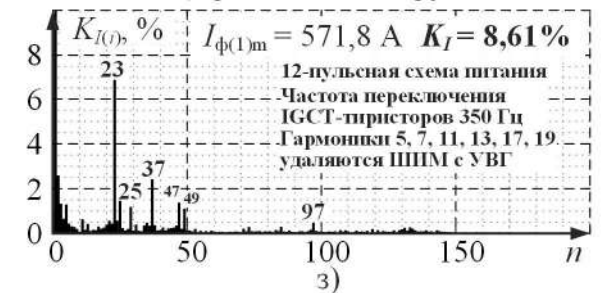
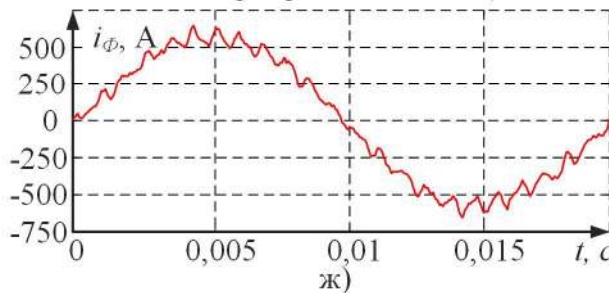
Электропривод клетки 2 (ячейка 8 ЗРУ-10 кВ РП-19), работа под нагрузкой



Электропривод клетки 3 (ячейка 3 ЗРУ-10 кВ РП-19), работа под нагрузкой



Электропривод клетки 4 (ячейка 10 ЗРУ-10 кВ РП-19), работа под нагрузкой



Электропривод моталки (ячейка 11 ЗРУ-10 кВ РП-19), работа под нагрузкой

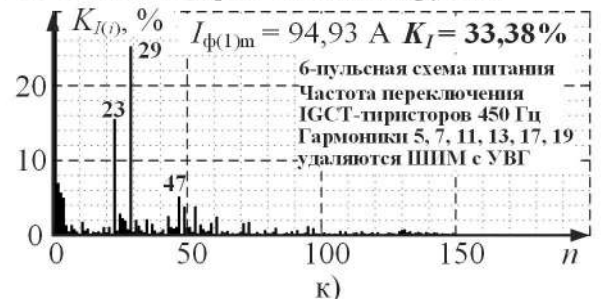
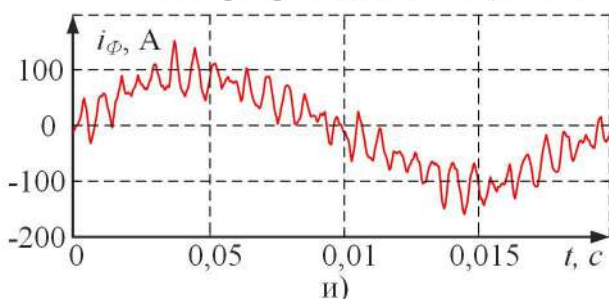


Рисунок 2.11 – Мгновенные значения токов главных электроприводов стана холодной прокатки при работе под нагрузкой и их гармонический состав

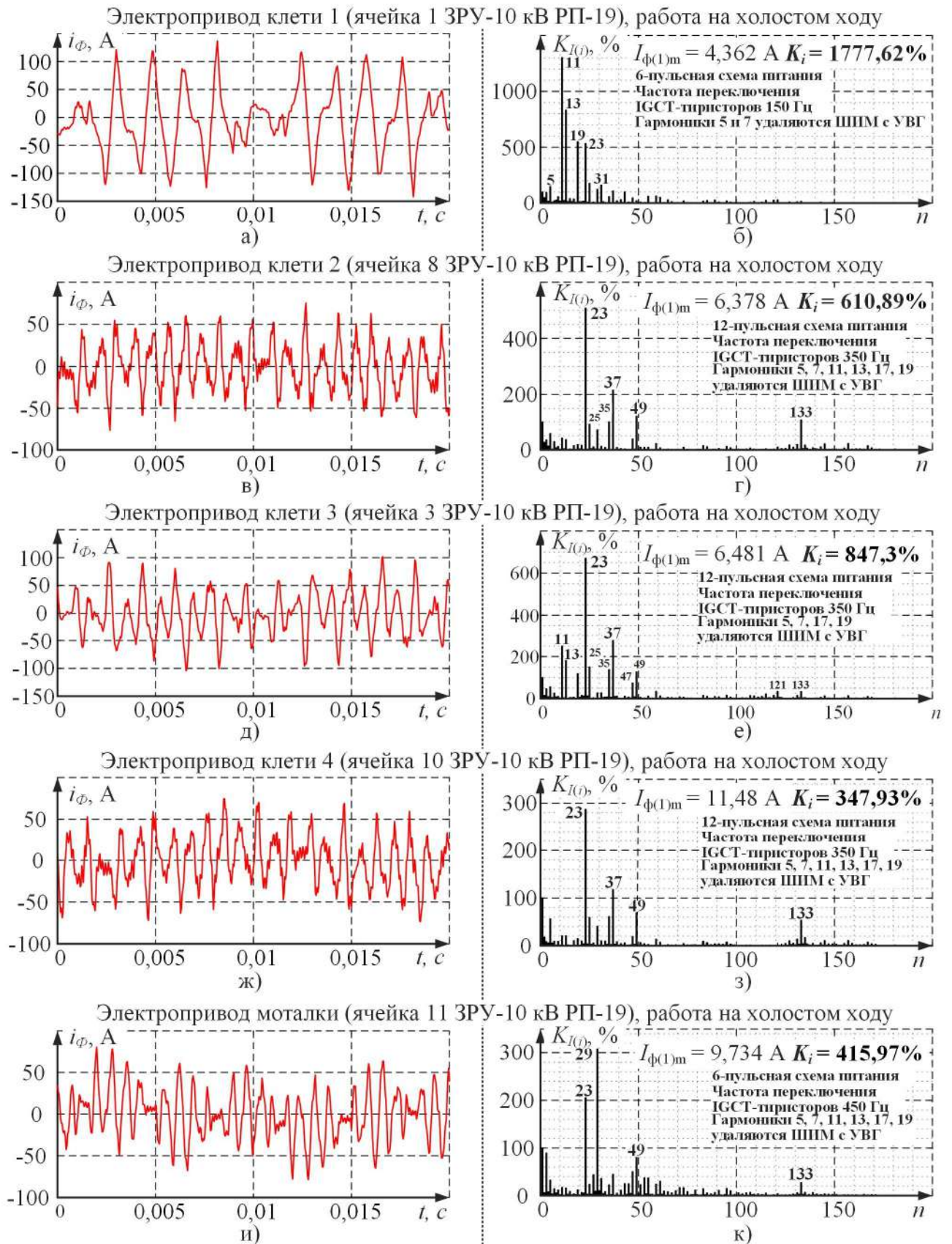


Рисунок 2.12 – Мгновенные значения токов главных электроприводов стана холодной прокатки при работе на холостом ходу и их гармонический состав



системе внутривозовского электроснабжения ЧерМК ПАО «Северсталь» не проводилась.

Используя программное обеспечение Drive Window, для оценки влияния режимов работы главных электроприводов четырёхклетьевого стана холодной прокатки на ПКЭ были записаны осциллограммы их основных параметров работы за цикл прокатки листа, рисунок 2.13, а именно угловых скоростей и моментов синхронных двигателей, токов АВ и АИН преобразователей частоты.

На рисунке 2.13 д) приведены значения коэффициента  $K_U$  для секций 1 и 2 ЗРУ-10 кВ ГПП-2 при их совместной работе от 2Т и для секций 1 и 2 ЗРУ-10 кВ РП-19 за цикл работы стана холодной прокатки.

Также, как и в случае предыдущего объекта исследований видно, что величина  $K_U$  остаётся практически неизменной при статических режимах работы электроприводов стана холодной прокатки и изменяется при динамических. После захвата листа всеми клетями стана начинается его разгон до рабочих скоростей. Токи АВ плавно увеличиваются по мере разгона стана. Характер изменения токов примерно одинаков для всех электроприводов.

В случае системы электроснабжения ЗАО «ММК Metalurji» при динамических режимах работы стана горячей прокатки фиксировалось снижение величины  $K_U$  для точки общего присоединения. Подобный процесс не наблюдается для секций 1 и 2 ЗРУ-10 кВ ГПП-2 при их совместной работе.

Величина  $K_U$  для секции 1 РП-19 также, как и величина  $K_U$  для секций ГПП-2, в динамических режимах работы электроприводов плавно увеличивается до значений характерных работе при нагрузке. Это вызвано увеличением отдельных гармонических составляющих токов электроприводов клеток 1 и 3, попадающих в резонансную область частотной характеристики сети, при изменении коэффициента модуляции СУ АВ. Протекание подобных процессов подчёркивает необходимость исследования показателей качества электроэнергии системы электроснабжения во всех статических и динамических режимах работы электроприводов на базе ПЧ-АВ.

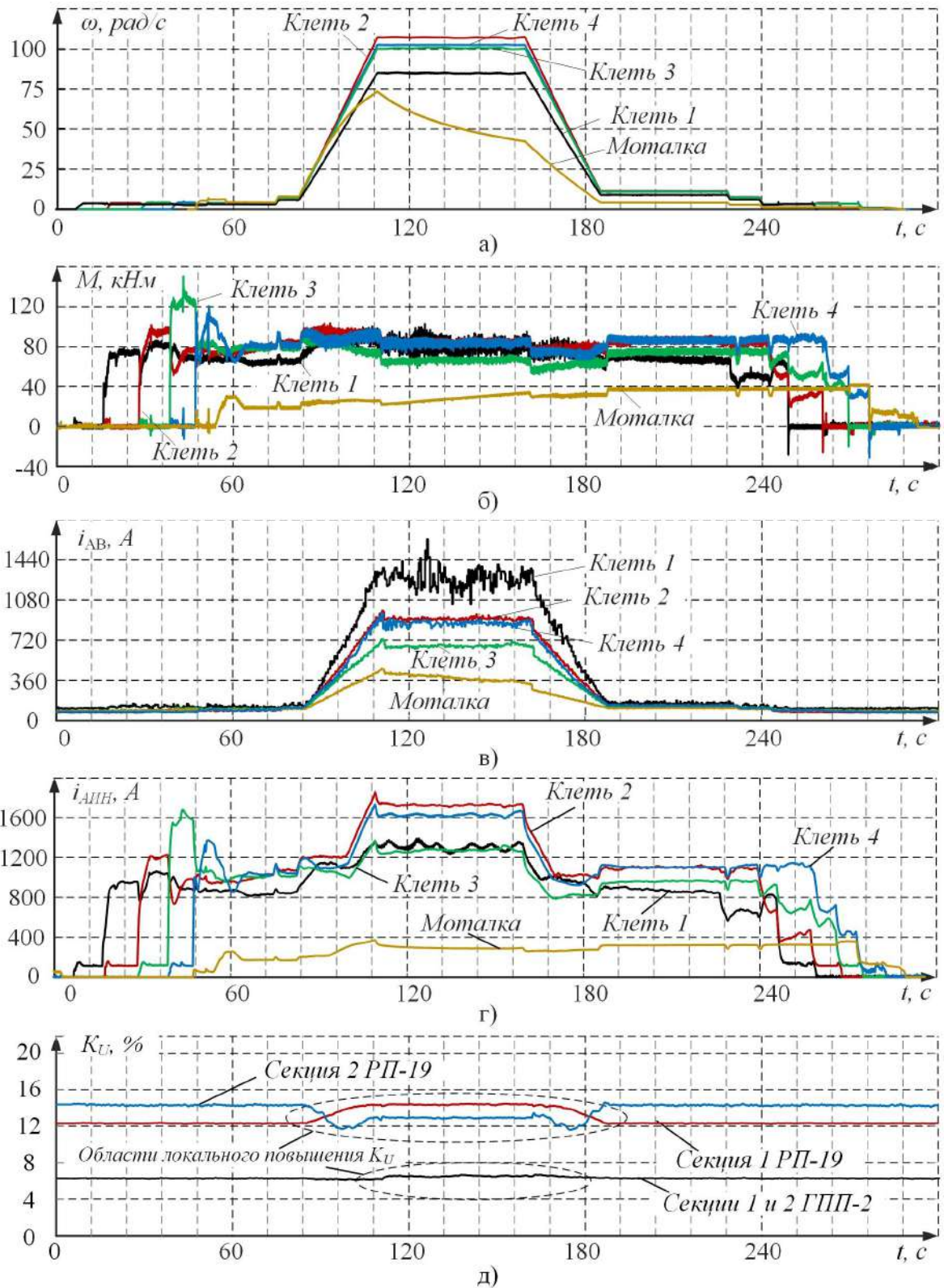


Рисунок 2.13 - Записанные мгновенные значения а) угловых скоростей, б) моментов синхронных двигателей, в) токов АВ, г) токов АИН главных электроприводов, д) коэффициента  $K_U$  для различных участков системы электроснабжения при совместной работе секций ГПП-2 ЧерМК  
 ПАО «Северсталь» за цикл работы стана холодной прокатки



Для анализа результатов экспериментальных исследований основные показатели качества электроэнергии приведены в таблицах 2.2 и 2.3.

Таблица 2.2 – результаты экспериментальных исследований показателей качества напряжения в системе внутризаводского электроснабжения ЧерМК ПАО «Северсталь»

Точка измерения	Параметр	Значение параметра
Ячейка 21 секции 1 ЗРУ-10 кВ ГПП-2	$U_{Л(1)т}$ , кВ	14,23
	$K_U$ , %	4,9
	Значимые гармоники	23, 29, 35, 37, 47, 49
Ячейка 1 секция 2 ЗРУ-10 кВ ГПП-2	$U_{Л(1)т}$ , кВ	14,85
	$K_U$ , %	5,71
	Значимые гармоники	11, 23, 31, 35, 37
Ячейка 1 совместная работа секции 1 и 2 ЗРУ-10 кВ ГПП-2 от 2Т	$U_{Л(1)т}$ , кВ	8,16
	$K_U$ , %	7,14
	Значимые гармоники	23, 29, 37
Ячейка 1 секция 1 ЗРУ-10 кВ РП-19	$U_{Л(1)т}$ , кВ	14,73
	$K_U$ , %	17,55
	Значимые гармоники	11, 23, 37, 49, 107, 109, 113
Ячейка 8 секция 2 ЗРУ-10 кВ РП-19	$U_{Л(1)т}$ , кВ	13,93
	$K_U$ , %	25,34
	Значимые гармоники	23, 37, 49, 97, 121, 123, 131

Таблица 2.3 – результаты экспериментальных исследований показателей качества тока электроприводов четырёхклетьевого стана холодной прокатки ЧерМК ПАО «Северсталь»

Точка измерения	Параметр	При работе ЭП под нагрузкой	При работе ЭП на холостом ходу
Ячейка 1 ЗРУ-10 кВ РП-19 (ЭП клетки 1)	$I_{Ф(1)т}$ , А	396,5	4, 36
	$K_I$ , %	20,54	1777,6
	Значимые гармоники	<u>11</u> , 13, 19, 23	<u>11</u> , 13, 19, 23
Ячейка 8 ЗРУ-10 кВ РП-19 (ЭП клетки 2)	$I_{Ф(1)т}$ , А	322,2	6, 38
	$K_I$ , %	13,61	610,9
	Значимые гармоники	<u>23</u> , 25, 37, 49	<u>23</u> , 37, 49, 133
Ячейка 3 ЗРУ-10 кВ РП-19 (ЭП клетки 3)	$I_{Ф(1)т}$ , А	472,4	6,48
	$K_I$ , %	14,21	847,3
	Значимые гармоники	11, 13, <u>23</u> , 37, 37	11, 13, <u>23</u> , 25, 35, 37, 49
Ячейка 10 ЗРУ-10 кВ РП-19 (ЭП клетки 4)	$I_{Ф(1)т}$ , А	571,8	11,5
	$K_I$ , %	8,61	347,9
	Значимые гармоники	<u>23</u> , 25, 37, 47	<u>23</u> , 37, 49, 133
Ячейка 11 ЗРУ-10 кВ РП-19 (ЭП моталки)	$I_{Ф(1)т}$ , А	94,93	9,73
	$K_I$ , %	33,38	416
	Значимые гармоники	23, <u>29</u> , 47	23, <u>29</u> , 49

### **2.3. Сравнительный анализ режимов работы электроприводов станов холодной и горячей прокатки с точки зрения влияния на показатели качества электроэнергии**

Проанализировав представленные на рисунках 2.8 и 2.13 мгновенные значения основных параметров электроприводов горячего и холодного станов за цикл прокатки, можно сделать вывод о наличии существенных различий в их режимах работы. Детально рассмотрим их с точки зрения влияния на ПКЭ.

На рисунке 2.14 а) показаны мгновенные значения угловой скорости электродвигателя черновой клетки R2 стана горячей прокатки ЗАО «ММК Metalurji» и суммарного тока АВ её электропривода за цикл прокатки листа. В начальный момент времени стан ожидает поступления сляба с МНЛЗ, валки клетки вращаются с небольшой скоростью холостого хода. После появления сляба перед станом по команде АСУ ТП все электропривода начинают осуществлять разгон до скорости захвата. Ток АВ при этом вырастает, но не превышает 10 % относительно номинальной величины. Заход сляба в клетку вызывает ударное увеличение нагрузки на электропривод, потребляемый электроприводом ток достигает величины 1167 А. После захвата металла валками всех клеток скорость прокатки снижается до основной, при этом также происходит и снижение суммарного тока АВ, составлявшего в среднем 900 А на всей длительности указанного режима. Выброс металла из клетки одновременно снижает нагрузку на электропривод – величина потребляемого тока уменьшается до значений холостого хода. Когда прокатанный лист выходит из последней клетки, скорость всех клеток снижается до скорости холостого хода.

Если рассматривать режимы работы стана горячей прокатки относительно величины суммарного тока АВ главных электроприводов, то можно выделить три характерных этапа: 1) работа без металла в клетках – ток АВ не превышает 10% от номинального (длительность 130 секунд или 52 % от времени цикла), 2) заход металла в клетку и прокатка на скорости захвата – самый тяжелый режим, токи АВ максимальные за цикл работы (длительность 30 секунд или 12 %), 3) прокатка

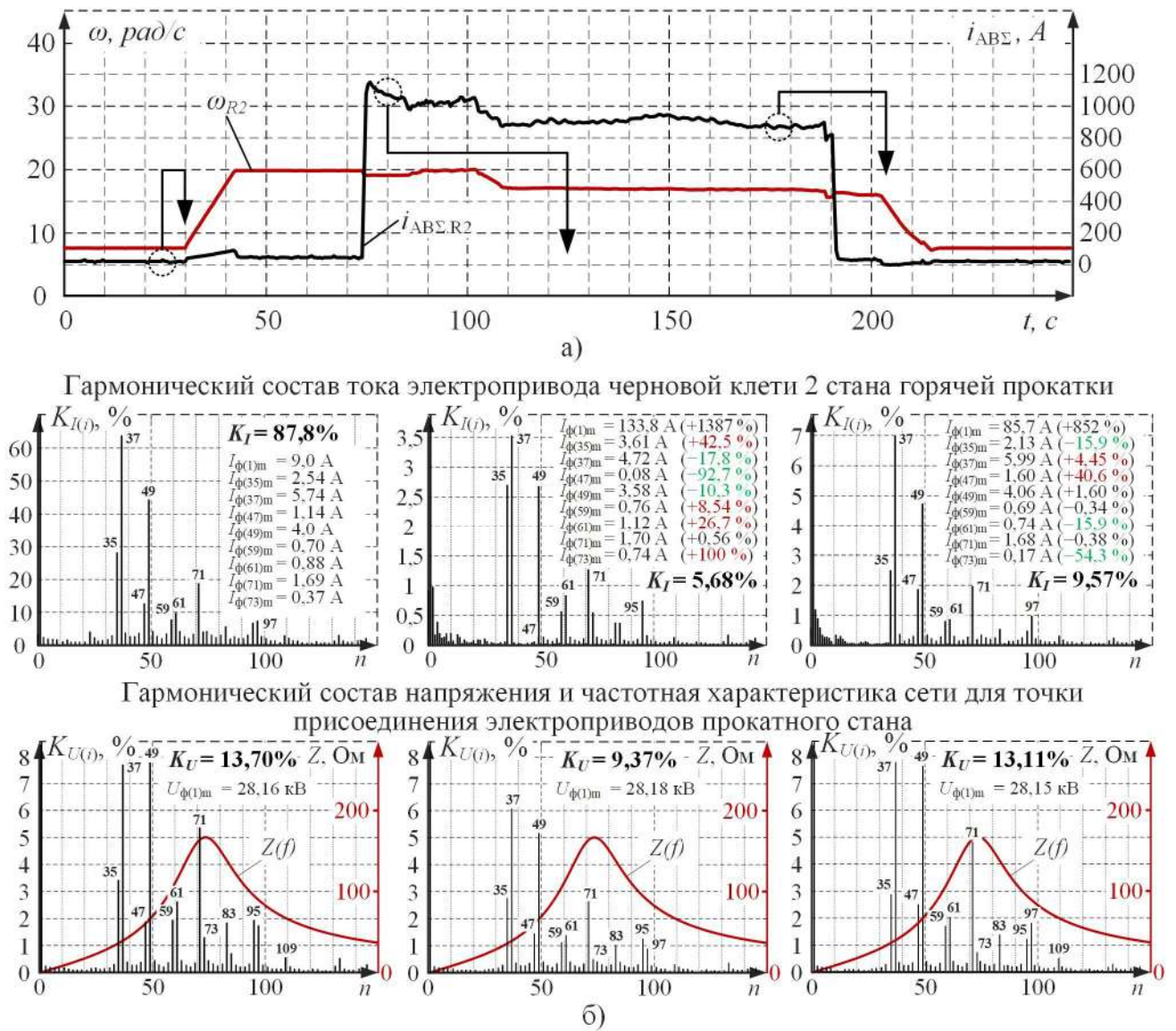


Рисунок 2.14 - Показатели качества электроэнергии (б) при различных режимах работы (а) электропривода черновой клетки 2 стана горячей прокатки 1750 ЗАО «ММК Metalurji»

металла на основной скорости – величины токов АВ меньше максимальных значений на 15-25% (длительность 90 секунд или 36 %).

Учитывая результаты проведённого анализа, для трёх рассмотренных режимов работы АВ были получены гистограммы гармонического состава тока электропривода клетки R2 и напряжения в точке его присоединения, рисунок 2.14 б).

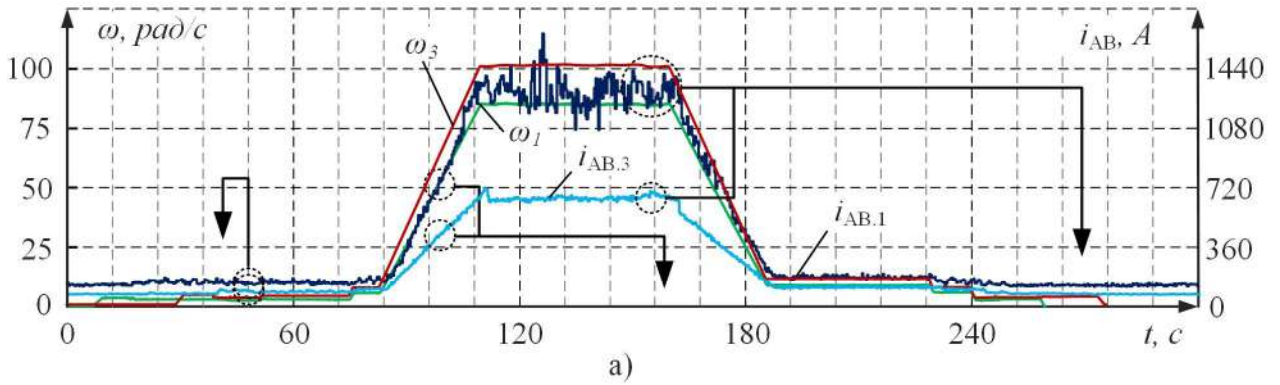
В гармоническом спектре тока во всех режимах работы присутствуют высокочастотные составляющие с одинаковыми номерами, однако можно заметить, что их амплитуды значительно изменяются. В режиме работы с

максимальным током амплитуда гармоники 35 увеличивается на 42,5 % относительно режима холостого хода, 47 гармоники снижается на 92,7 %, 73 гармоника увеличивается в два раза. При работе на основной скорости прокатки в гармоническом спектре тока электропривода относительно режима работы на холостом ходу сильнее всего изменяется величина гармоники 73 – –54,3 %. Также на 15,9 % уменьшаются амплитуды гармоник 59 и 35, но увеличивается гармоника 47 на 40,6 %. Наилучшие показатели качества напряжения сети 34,5 кВ в точке присоединения электроприводов стана наблюдаются при работе ПЧ-АВ с максимальной величиной тока.

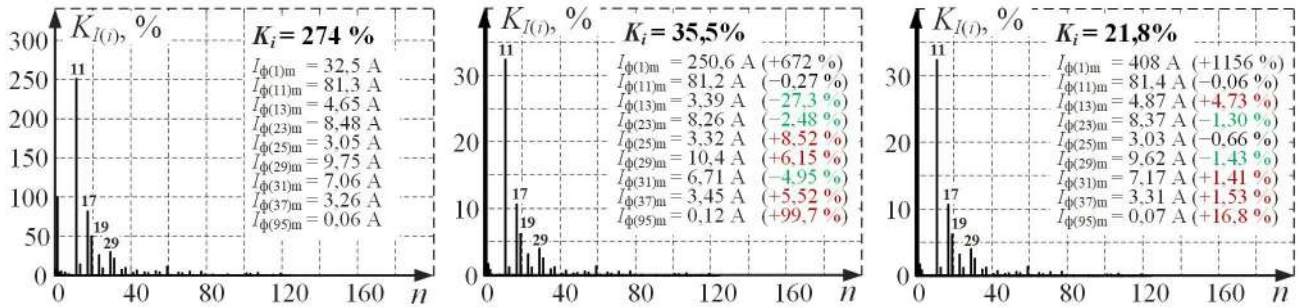
На рисунке 2.15 а) представлены мгновенные значения угловых скоростей электродвигателей клетей 1 и 3 стана холодной прокатки ЧерМК ПАО «Северсталь» и токов АВ их электроприводов за цикл прокатки листа. Технология работы стана холодной прокатки имеет отличия от технологии стана горячей прокатки. В начальный момент цикла работы стана валки клетей вращаются на заправочной скорости до тех пор, пока лист не войдёт во все клетки. Токи АВ в этом режиме не превышают 10-20 % от максимальных величин. Затем начинается разгон всех клетей до заданной согласно технологической карте скорости прокатки. Увеличение величины тока АВ происходит пропорционально росту скорости. Перед окончанием листа скорость валков клетей стана также плавно снижается до значений заправочной скорости, после чего лист выходит из клетей.

Также, как и в случае стана горячей прокатки, для АВ главных электроприводов стана холодной прокатки можно выделить три основных режима работы в зависимости от технологического процесса стана: 1) работа на заправочной скорости с металлом в клетях или без него – ток АВ не превышает 10-20 % от максимальных за цикл значений (длительность 200 секунд или 66,6 % от времени цикла), 2) разгон или торможение стана – ток АВ плавно изменяется в широких пределах от минимальных значений до максимальных и наоборот (длительность 50 секунд или 16,7 %), 3) работа на скорости прокатки – максимальные значения токов АВ за цикл (длительность 50 секунд или 16,7 %).

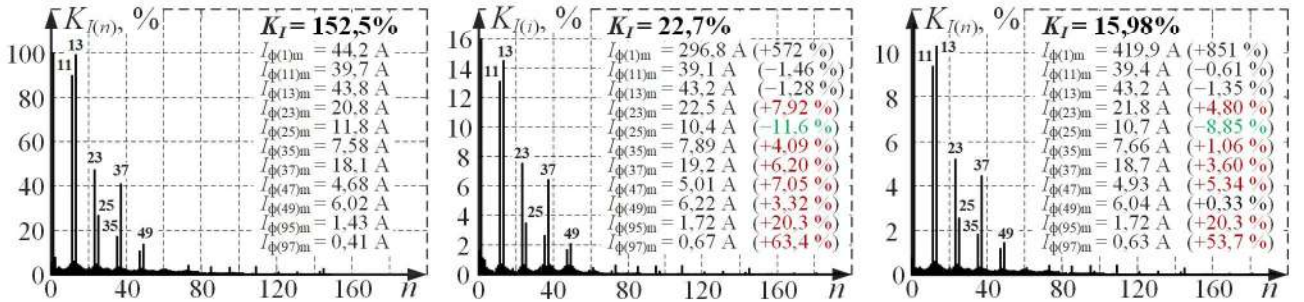




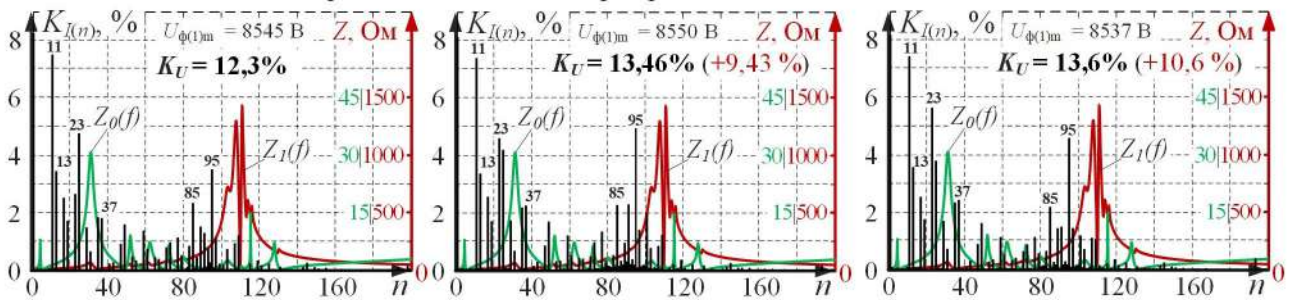
Гармонический состав тока электропривода клетки 1 стана холодной прокатки



Гармонический состав тока электропривода клетки 3 стана холодной прокатки



Гармонический состав напряжения и частотная характеристика сети Z<sub>1</sub>(f) для точки присоединения электроприводов клеток 1 и 3



Примечание:  $Z_0(f)$  – частотная характеристика сети относительно точки общего присоединения электропрёмников – секций ГПП-2 при их совместной работе от одного понизительного трансформатора 110/10 кВ;  
 $Z_1(f)$  – частотная характеристика сети относительно точки присоединения электроприводов клеток 1 и 3 – секции 1 РП-19.

б)

Рисунок 2.15 - Показатели качества электроэнергии (б) при различных режимах работы (а) электроприводов клеток 1 и 3 стана холодной прокатки ЧерМК

ПАО «Северсталь»

Для каждого из указанных режимов работы АВ были получены гистограммы гармонического состава тока электроприводов клеток 1 и 3 и напряжения в точке их присоединения, рисунок 2.15 б). При работе АВ электроприводов клетки 1 со сниженной нагрузкой относительно режима работы на заправочной скорости наблюдается увеличение амплитуд значимых гармоник 25 (+8,52 %), 29 (+6,15 %), 95 (+99,7 %) и снижение амплитуд гармоник 13 (-27,3 %), 31 (-4,95 %). Для режима работы на скорости прокатки: увеличение 13 (+4,73 %) и 95 (+16,8 %) гармоник.

Схожий характер изменения величин отдельных гармоник при различных режимах работы показывают гистограммы гармонического состава тока электропривода клетки 3. Максимальное изменение величины отдельной гармонической составляющей составило +63,4 % для гармоники 97 при разгоне электропривода и 53,7 % при работе стана на скорости прокатки. Стоит отметить, что гармоники 95 и 97 попадают в резонансную область частотной характеристики питающей сети и значительное увеличение их амплитуд оказывает сильный эффект на качество напряжения в точке присоединения электроприводов. В отличие от предыдущего рассмотренного объекта исследований, наилучшее значение  $K_U$  достигается работе электроприводов без нагрузки.

Результаты сравнительного анализа в обоих случаях показывают важность учёта режимов работы электроприводов при оценке их влияния на ПКЭ. В тоже время присутствуют и отличия. Наименьшая величина  $K_U$  в случае стана горячей прокатки достигается при динамических режимах наброса и сброса нагрузки, рисунок 2.8 г). Это обусловлено тем, что часть АВ работает без нагрузки с одним коэффициентом модуляции и значениями углов переключения, а часть – при максимальной за цикл работы нагрузке и с другими значениями углов переключения. Величины отдельных гармонических составляющих токов ПЧ-АВ могут как суммироваться, так и компенсировать друг друга, если лежат в противофазе. Иной характер роста нагрузки характерен для стана холодной прокатки – нагрузка увеличивается плавно и одновременно для всех клеток, поэтому при динамических режимах работы отсутствуют значительные изменения величины  $K_U$ , рисунок 2.13 д).

Изменение величины отдельных гармонических составляющих токов АВ, попадающих в резонансную область частотной характеристики сети, оказывает значительное влияние на качество напряжения системы электроснабжения. При поиске оптимальной таблицы углов переключения силовых ключей АВ по методу ШИМ с УВГ или ПВГ, помимо наличия резонансных явлений в частотной характеристике питающей сети, необходимо учитывать все статические и динамические режимы работы электропривода. Поиск одной таблицы, оптимальной сразу для всех режимов, может быть затруднителен. В связи с этим необходима разработка новых решений, способных улучшить ЭМС ПЧ-АВ с питающей сетью во всех режимах работы.

#### 2.4. Выводы по главе 2

1. Результаты экспериментальных исследований качества напряжения внутризаводской системы электроснабжения 34,5 кВ ЗАО «ММК Metalurji» и системы электроснабжения 10 кВ ЧерМК ПАО «Северсталь» показали наличие существенных искажений напряжения, вызванных работой мощных ПЧ-АВ в составе электроприводов прокатных станов. Величина  $K_U$  для секции D ГПП ЗАО «ММК Metalurji» в зависимости от режима работы стана составляла 12,36-13,24 %; для секций ГПП-2 ЧерМК были зафиксированы значения 4,9-7,14 % при допустимой величине согласно стандарту [95] 5 %. Низкое качество напряжения в точке общего присоединения оказывает негативное влияние на работу чувствительных электроприёмников, что приводит к их аварийной работе или выходам из строя.

2. Столь значительные искажения питающего напряжения обусловлены наличием резонансных явлений в частотных характеристиках сетей 10 кВ и 34,5 кВ указанных предприятий, возникающих из-за взаимного влияния индуктивностей сетевых трансформаторов с суммарной ёмкостью кабельных линий. Для секций ГПП системы внутризаводского электроснабжения ЧерМК характерно наличие сложной резонансной частотной характеристики, что обусловлено наличием токоограничивающих реакторов в ячейках ГПП-2.

3. Параметры применяемых алгоритмов ШИМ с УВГ АВ не учитывают наличие резонансных явлений в частотных характеристиках сетей предприятий.

Попадание высших гармонических составляющих тока ПЧ-АВ в область экстремума импеданса приводит к появлению падения напряжения на соответствующей частоте, что сильно искажает форму напряжения в точке общего присоединения.

4. Результаты экспериментальных исследований влияния режимов работы электроприводов прокатных станов на базе ПЧ-АВ на качество электроэнергии во внутризаводских распределительных сетях показали важность учёта отдельных режимов работы электроприводов. Поскольку изменение коэффициента  $K_U$  в режимах работы на холостом ходу, наброса нагрузки, при разгоне и торможении, при работе с номинальным моментом при установившейся скорости прокатки может достигать  $\pm 30\%$ , при этом изменение отдельных гармонических составляющих напряжения может составлять  $100\%$ . Увеличение гармоник тока, попадающих в резонансную область частотной характеристики сети, приводит к ухудшению показателей качества напряжения. В этом случае для обеспечения наилучшей ЭМС ПЧ-АВ с питающей сетью необходима разработка новой СУ АВ с возможностью применения различных таблиц углов переключения, оптимальных для каждого статического и динамического режима.

5. Отличительной особенностью динамических режимов работы электроприводов стана горячей прокатки по сравнению с электроприводами стана холодной прокатки является ступенчатый ударный рост суммарного сетевого тока группы АВ, в результате чего происходит резкое изменение амплитуд токов высших гармоник, в том числе попадающих в резонанс частотной характеристики питающей сети. Это приводит к быстрому изменению суммарного коэффициента гармонических составляющих  $K_U$  в точке общего присоединения. В случае электроприводов стана холодной прокатки имеют место длительные динамические режимы разгона и торможения электроприводов клеток, что определяет соответствующий характер изменения суммарного сетевого тока и отдельных гармонических составляющих напряжения и тока. Данные обстоятельства должны быть учтены при разработке требований к усовершенствованной системе управления с динамическим выбором таблиц углов переключения в плане её быстродействия и определения параметров оптимальных углов переключения для каждого режима работы электропривода.



### **ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫХ АЛГОРИТМОВ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АКТИВНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ С ДИНАМИЧЕСКИМ ВЫБОРОМ ОПТИМАЛЬНОЙ ТАБЛИЦЫ УГЛОВ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ СИЛОВЫХ КЛЮЧЕЙ**

В качестве способа обеспечения ЭМС ПЧ-АВ с питающей сетью во всех режимах работы электропривода может стать усовершенствованная система управления АВ с динамическим выбором таблицы углов переключения силовых ключей на основе алгоритмов ШИМ с УВГ или ПВГ. Благодаря такому решению появляется возможность достичь наилучших ПКЭ при работе электроприводов на базе ПЧ-АВ во всех статических и динамических режимах.

#### **3.1. Усовершенствованная система управления активного выпрямителя с динамической сменой таблиц 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 [123,124]. Её функциональная схема при 6-пульсной схеме питания приведена на рисунке 3.1.

Данная СУ реализована на базе типовой СУ АВ с ШИМ с УВГ, рассмотренной в главе 1. Система регулирования осталась прежней, все изменения выполнены в блоке ШИМ. В предыдущей главе при рассмотрении режимов работы электроприводов прокатных станов было обнаружено наличие трёх основных режимов работы, входящих в их состав АВ. В связи с этим в усовершенствованной СУ АВ применяются три различные таблицы углов переключения для каждого из них.

На входах таблиц задаётся коэффициент модуляции  $m$ , сформированный системой регулирования. На их выходах формируются величины углов переключения  $\alpha_{1...n}$ , соответствующие данному значению коэффициента модуляции

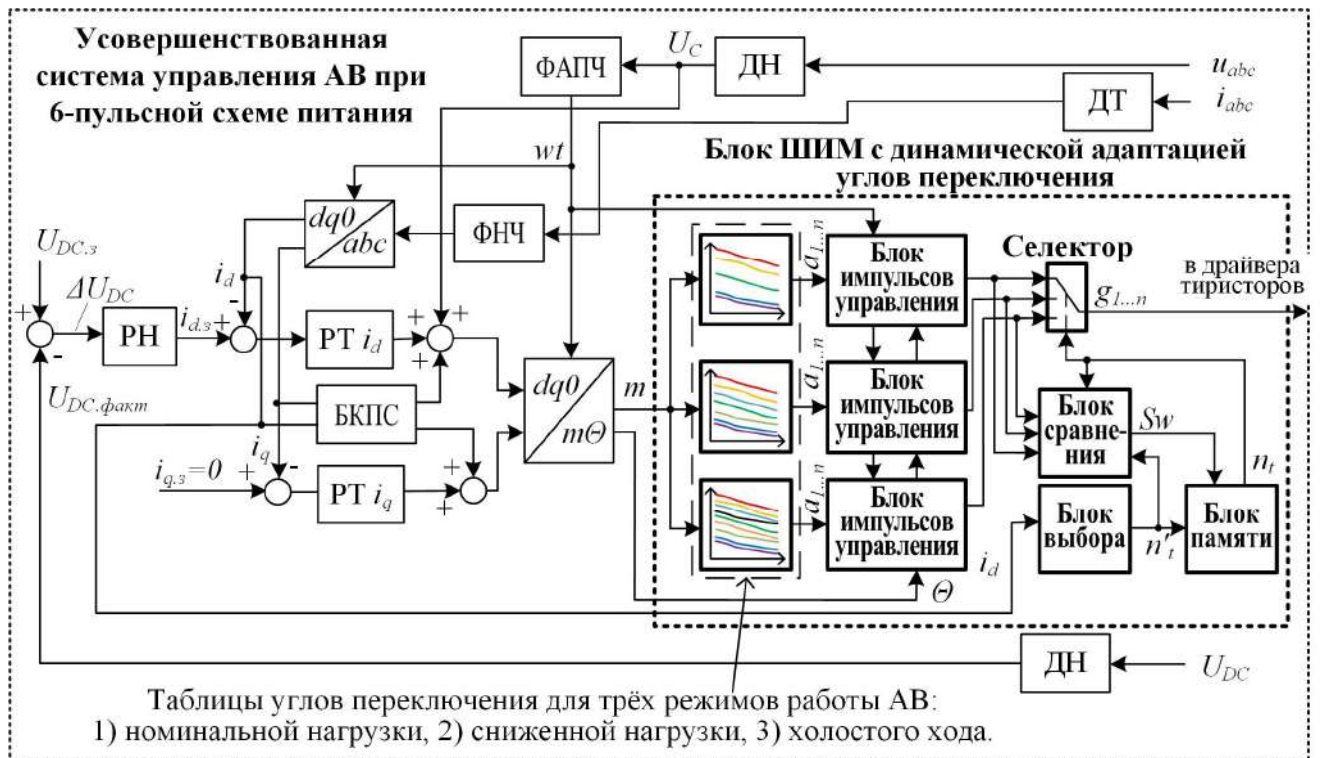


Рисунок 3.1 – Функциональная схема предлагаемой усовершенствованной СУ АВ с динамическим выбором таблицы углов переключения полупроводниковых вентилей

$m$ . Они передаются в блоки импульсов управления, где происходит формирование сигналов управления полупроводниковыми ключами АВ  $g_{1..n}$  путём сравнения величин углов коммутации с суммой величин опорного сигнала  $wt$  и угла фазового сдвига  $\Theta$ , сформированного системой регулирования. Селектор обеспечивает передачу в драйверы тиристоров преобразователя сигналов управления, полученных при использовании необходимой таблицы.

Управление селектором осуществляет специальная система, состоящая из трёх блоков со своей специальной функцией: сравнения, выбора и памяти. Для определения текущего режима работы электропривода и выбора необходимого набора углов переключения  $n'_t$  используется ортогональная составляющая тока АВ  $i_d$ . В блок сравнения поступают сигналы номера текущей таблицы  $n_t$ , необходимой  $n'_t$ , а также значения углов коммутации силовых ключей со входа селектора. Блок сравнения анализирует текущее состояние силовых ключей и их возможное состояние при переходе на требуемый набор углов переключения. В случае, если переход не потребует дополнительные переключения силовых ключей,

превышающие разрешённое значение, блок сравнения сформирует логический сигнал разрешения перехода  $S_w$ . Данный сигнал передаётся в блок памяти, который в этот момент сохраняет значение  $n'_t$  как  $n_t$ . По сигналу  $n_t$  селектор осуществляет коммутирование одного из своих входов на выход.

Реализация усовершенствованной СУ АВ для ПЧ-АВ с многопульсными схемами питания заметно усложняется. При 12-пульсной схеме выпрямления в гармоническом спектре потребляемого электроприводом тока отсутствуют гармоники 5, 6, 17, 19, 29, 31 и т.д. Указанные гармонические составляющие токов отдельных АВ лежат в противофазе друг другу и за счёт взаимного сложения не присутствуют в токе первичной обмотки трансформатора. Следует отметить, что для достижения данного эффекта амплитуды сокращаемых гармоник каждого АВ должны быть одинаковы. А это означает, что используемые наборы углов переключения силовых ключей также должны быть одинаковыми для каждого АВ. Соответственно динамическая смена таблиц усовершенствованной СУ при многопульсных схемах питания ПЧ-АВ должна происходить одномоментно.

На рисунке 3.2 показана функциональная схема усовершенствованной СУ АВ с динамическим выбором таблиц углов переключения полупроводниковых вентилей для ПЧ-АВ с 12-пульсной схемой питания. Для каждого АВ реализована своя система регулирования напряжения в ЗПТ  $U_{DC}$  и блок ШИМ, но блоки выбора и памяти являются общими. Величины ортогональных составляющих токов АВ по оси  $d - i_{d1}$  и  $i_{d2}$  – задаются на входе блока выбора. Номер необходимой таблицы  $n'_t$  передаётся в блоки ШИМ каждого АВ, в которых блоки сравнения формируют логический сигнал разрешения смены набора  $S_{w1}$  и  $S_{w2}$ . Общий сигнал разрешения смены таблиц  $S_w$  формируется путём логического умножения  $S_{w1}$  и  $S_{w2}$ . По сигналу  $S_w$  блок памяти перезаписывает номер текущей таблицы  $n_t$  номером требуемой  $n'_t$ , в результате чего происходит одновременное переключение двух селекторов.

Аналогичным образом возможна реализация предлагаемой усовершенствованной СУ АВ при 18-пульсной схеме питания ПЧ-АВ.

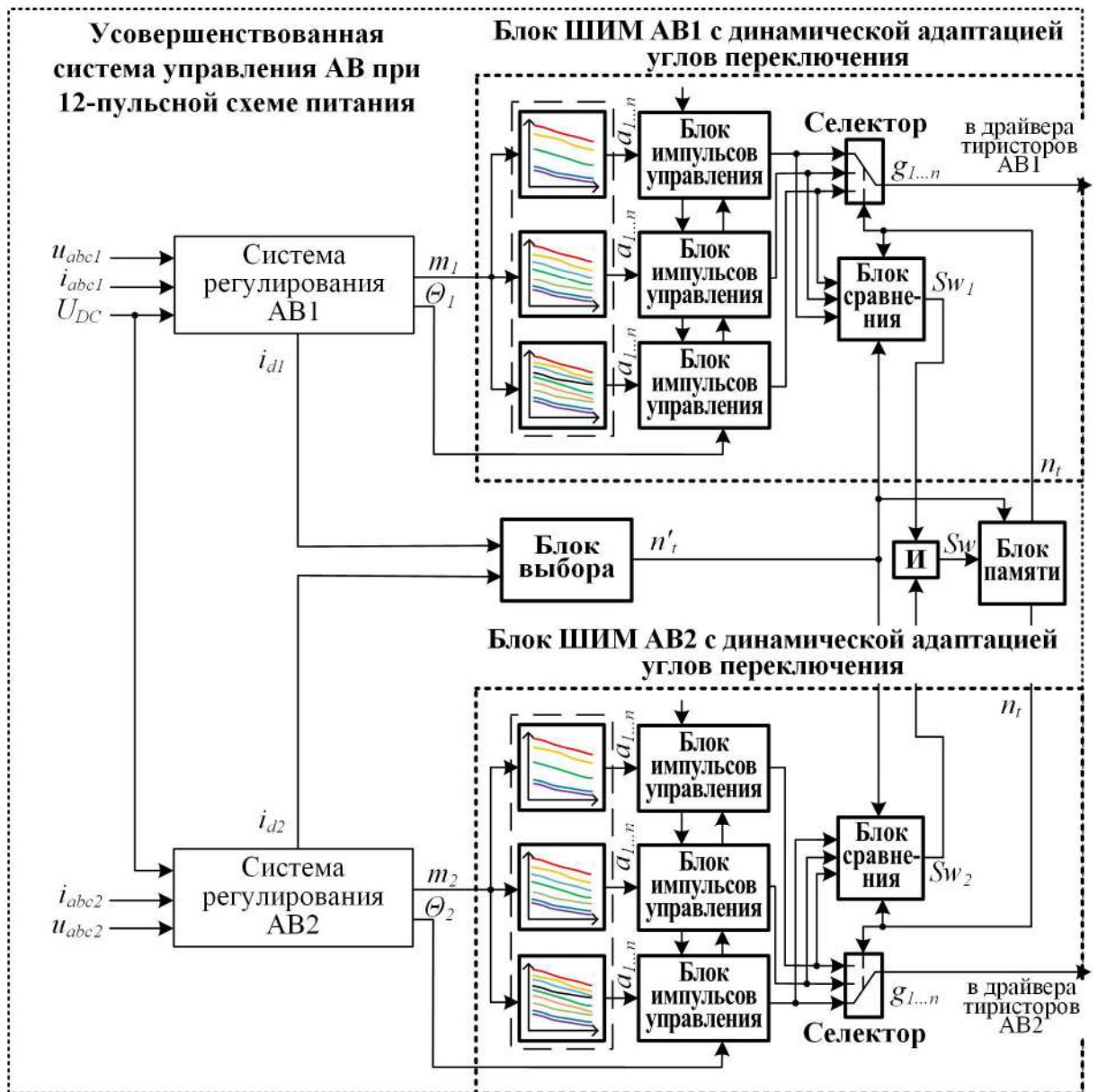


Рисунок 3.2 – Функциональная схема предлагаемой усовершенствованной СУ АВ при 12-пульсной схеме питания ПЧ-АВ

Для внедрения на действующем оборудовании усовершенствованной СУ АВ требуется решить ряд задач, которые можно сформировать после анализа её функциональной схемы и описанного принципа работы:

1. Необходимость разработки методики расчёта оптимальных таблиц углов переключения силовых ключей для каждого режима работы АВ.
2. Определение критериев выбора требуемого для текущего режима работы электропривода набора углов переключения с условием обеспечения максимальной эффективности усовершенствованной СУ АВ и в тоже время сохранения стабильности работы преобразователя.

3. Настройка и анализ функционирования блока сравнения – ожидание момента совпадения состояний силовых ключей при переходе с одного набора на другой может вызывать задержки. С другой стороны, переход с большим числом переключений вызовет значительные тепловые потери в полупроводниковых вентилях и может привести к возмущающим воздействиям на регулируемые параметры электропривода.

Решение первых двух задач взаимосвязанно и будет рассмотрено в дальнейшем в отдельной главе данной работы. Для решения третьей поставленной задачи требуется разработка имитационной модели усовершенствованной СУ АВ.

### **3.2. Разработка имитационной модели усовершенствованной системы управления активного выпрямителя**

Имитационная модель усовершенствованной СУ АВ с динамическим выбором таблицы углов переключения была разработана в графической среде программирования Simulink пакета прикладных программ Matlab [125]. Как уже было отмечено ранее, система регулирования в предлагаемой СУ АВ не отличается от типовой при реализации алгоритма ШИМ с УВГ или ПВГ, поэтому детально рассмотрим только реализацию блока ШИМ. На рисунке 3.3 показана разработанная имитационная модель блока ШИМ усовершенствованной СУ АВ для 6-пульсной схемы питания ПЧ.

В левой части блока ШИМ показаны входные сигналы из системы регулирования, а именно: коэффициент модуляции  $m$ , величина ортогональной составляющей тока АВ  $i_d$ , суммы фазных сигналов синхронизации с питающей сетью и угла фазового сдвига  $wt_A + \Theta$ ,  $wt_B + \Theta$ ,  $wt_C + \Theta$ . Величины сигналов синхронизации для каждой фазы могут быть получены путём смещения величины  $wt$  на  $0$ ,  $2\pi/3$  и  $4\pi/3$  или вычислены дополнительными блоками ФАПЧ.

Таблицы углов переключения представлены с помощью блоков «LookUp Table» из библиотеки Simulink. Рассчитанные значения углов переключения  $a_{1..n}$  в

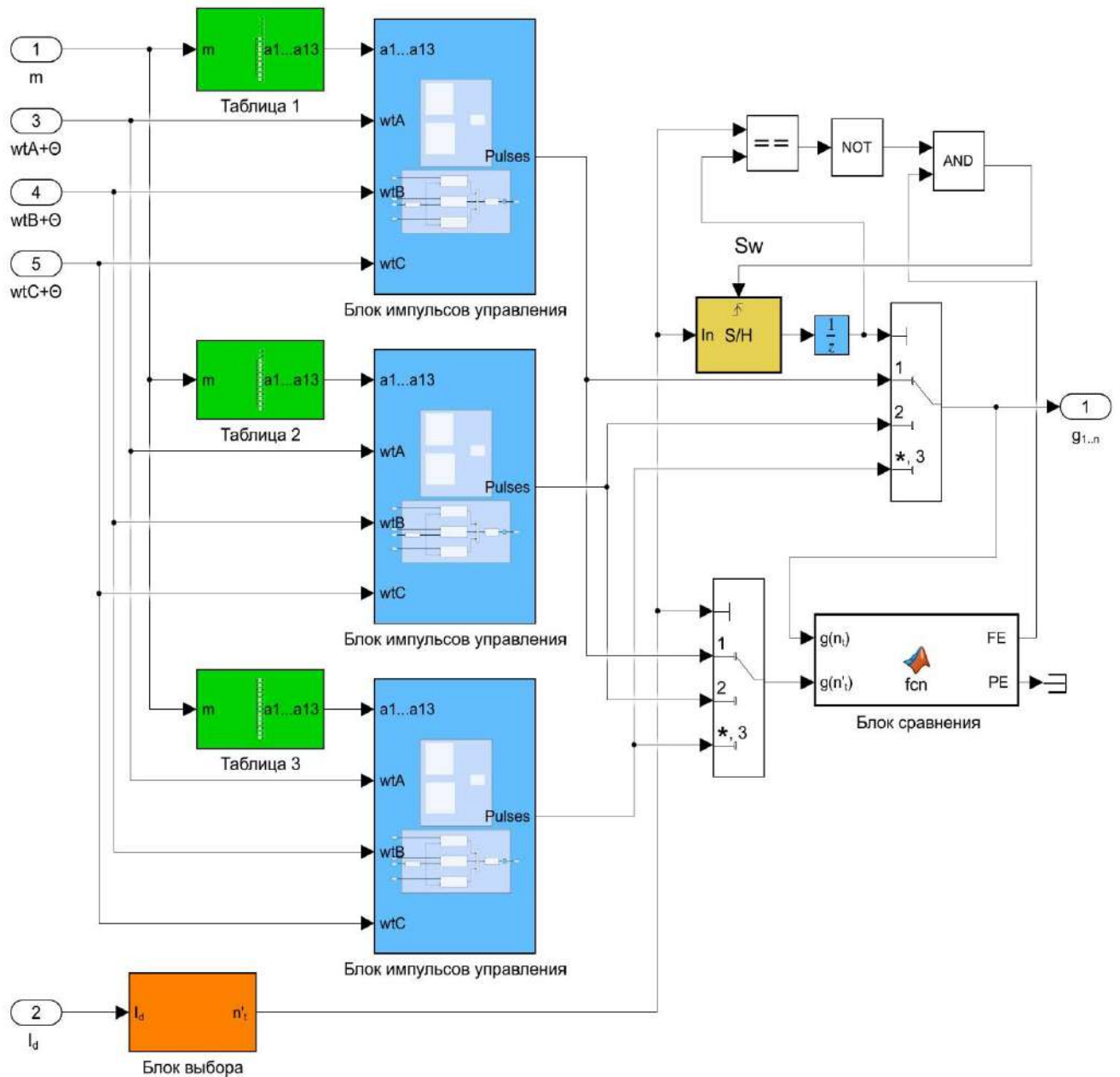


Рисунок 3.3 – Имитационная модель блока ШИМ усовершенствованной СУ АВ в среде Matlab-Simulink

зависимости от величины коэффициента модуляции сохраняются в специальных полях диалогового окна элемента.

Рассмотрим реализацию блока импульсов управления, отвечающего за формирование сигналов управления тиристорами. В зависимости от значений углов переключения и величины опорного сигнала на входе АВ могут быть получены три уровня фазных напряжений:



$$+\frac{U_{DC}}{2} = \begin{cases} ((wt + \theta) > a_1) \text{ И } ((wt + \theta) < a_2) \\ ((wt + \theta) > a_3) \text{ И } ((wt + \theta) < a_4) \\ \dots \\ ((wt + \theta) > a_N) \text{ И } ((wt + \theta) < (\pi - a_N)) \\ ((wt + \theta) > (\pi - a_{N-1})) \text{ И } ((wt + \theta) < (\pi - a_{N-2})) \\ \dots \\ ((wt + \theta) > (\pi - a_2)) \text{ И } ((wt + \theta) < (\pi - a_1)) \end{cases} \quad (3.1)$$

$$-\frac{U_{DC}}{2} = \begin{cases} ((wt + \theta) > (\pi + a_1)) \text{ И } ((wt + \theta) < (\pi + a_2)) \\ ((wt + \theta) > (\pi + a_3)) \text{ И } ((wt + \theta) < (\pi + a_4)) \\ \dots \\ ((wt + \theta) > (\pi + a_N)) \text{ И } ((wt + \theta) < (2\pi - a_N)) \\ ((wt + \theta) > (2\pi - a_{N-1})) \text{ И } ((wt + \theta) < (2\pi - a_{N-2})) \\ \dots \\ ((wt + \theta) > (2\pi - a_2)) \text{ И } ((wt + \theta) < (2\pi - a_1)) \end{cases} \quad (3.2)$$

иначе 0.

Для их формирования необходимы следующие состояния силовых ключей фазного модуля АВ Т<sub>1</sub> – Т<sub>4</sub>, рисунок 1.2:

$$\begin{aligned} +\frac{U_{DC}}{2} &= [1 \quad 1 \quad 0 \quad 0] \\ +\frac{U_{DC}}{2} &= [0 \quad 0 \quad 1 \quad 1] \\ 0 &= [0 \quad 1 \quad 1 \quad 0] \end{aligned} \quad (3.3)$$

Реализация столь сложных математических зависимостей с помощью базовых блоков в графической среде Simulink нецелесообразна. Поэтому она была выполнена с помощью функций «Matlab Function», позволяющих использовать код на языке программирования Matlab в среде Simulink. Каждая из трёх функций отвечает за формирование сигналов управления тиристорами для одной из фаз АВ.

Сформированные сигналы управления полупроводниковыми вентилями АВ для трёх наборов углов переключения поступают на входы двух управляемых переключателей – селекторов, реализованных с помощью блоков «Multi-Port Switch». Один из селекторов управляется с помощью блока памяти, второй переключается незамедлительно по сигналу  $n'_i$ .

Благодаря этому несколько упрощается реализация блока сравнения, в который передаются состояния тиристоров при использовании текущей таблицы и

требуемой. Блок сравнения формирует два логических сигнала: сигнал FE – полного соответствия состояния полупроводниковых вентилях при текущем наборе значений углов переключения и требуемом, т.е. отсутствие дополнительных коммутации тиристоров при смене таблицы; сигнал PE – необходимость переключения одного тиристора. Первый вариант предпочтителен с точки зрения минимизации возмущающих воздействий на регулируемые параметры АВ и отсутствия дополнительных тепловых потерь при коммутации. Однако, необходимо оценить возникающие при этом задержки на смену таблицы. Блок сравнения также выполнен с помощью функции «Matlab Function».

Блок памяти реализован на базе элемента «Sample and Hold». На его вход задаётся номер требуемой таблицы. Сверху от него размещены элементы сравнения «==», инверсии «NOT» и логического умножения «AND». В случае, если номер требуемой таблицы  $n'$  отличается от номера текущей таблицы  $n_i$  на выходе «S/H» и присутствует логический сигнал FE, блок памяти по переднему фронту сигнала  $Sw$  запоминает величину  $n'$  как текущую. В этот же момент времени происходит переключение селектора и в драйверы тиристоров начинают передаваться сигналы управления, формируемые другим набором углов переключения.

Блок «Unit Delay» подключенный к выходу элемента «Sample and Hold» необходим для функционирования имитационной модели, задерживает передачу сигнала на один период вычисления. Без его использования при запуске имитационной модели возникает алгебраическая петля.

Аналогичным образом была реализована имитационная модель усовершенствованной СУ АВ при 12-пульсной схеме питания ПЧ, рисунок 3.4. Блоки таблиц, расчёта импульсов управления, сравнения и селекторы были продублированы для второго АВ. Логический сигнал  $Sw$  для функционирования блока памяти «S/H» в данной СУ формируется при одновременном выполнении трёх условий: номер требуемой таблицы  $n'$  отличается от номера текущей таблицы  $n_i$ ; оба блока сравнения сформировали логические сигналы разрешения смены таблиц FE. В результате чего селекторы, обеспечивающие передачу сигналов

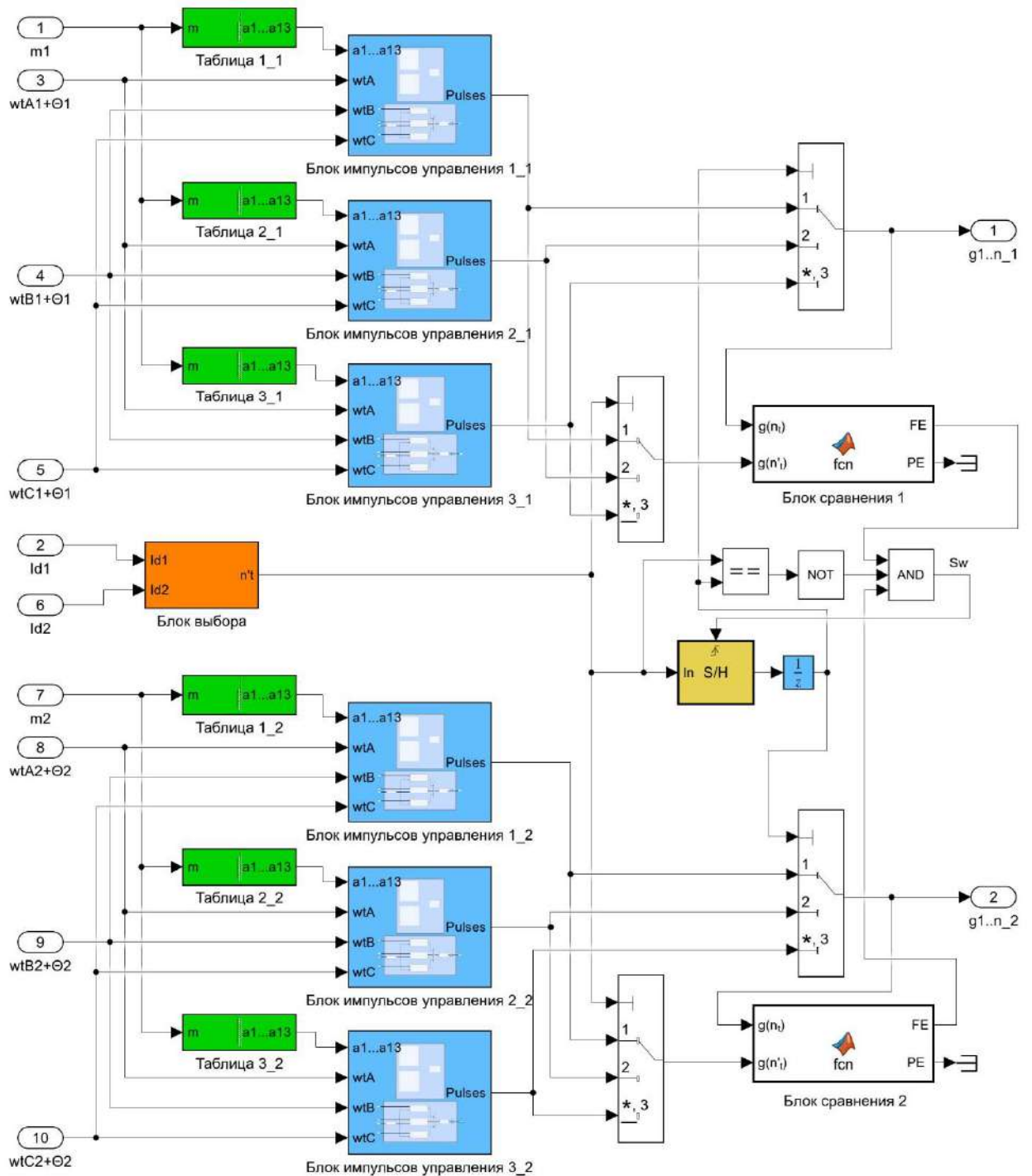


Рисунок 3.4 – Имитационная модель блока ШИМ усовершенствованной СУ АВ для 12-пульсной схемы питания

управления силовыми ключами каждого АВ на выход блока ШИМ, переключаются одновременно. На вход блока выбора, формирующего номер требуемой таблицы  $n'$ , задаются величины ортогональной составляющей тока  $i_d$  двух АВ.

### 3.3. Разработка имитационных моделей систем электроснабжения и электроприводов с ПЧ-АВ прокатных станов ЗАО «ММК Metalurji» и ЧерМК ПАО «Северсталь»

Проведение исследований режимов работы ПЧ-АВ с усовершенствованной СУ АВ, оценка её эффективности с точки зрения влияния на ПКЭ не могут проводиться только на основе разработанной имитационной модели самой СУ. Для осуществления детальных исследований требуется разработка комплексных имитационных моделей систем электроснабжения предприятий и электроприводов на базе ПЧ-АВ клетей прокатных станов. Данные модели должны адекватно учитывать частотные характеристики сетей 6-35 кВ, а также точно воспроизводить работу ПЧ-АВ электроприводов прокатного стана во всех режимах работы.

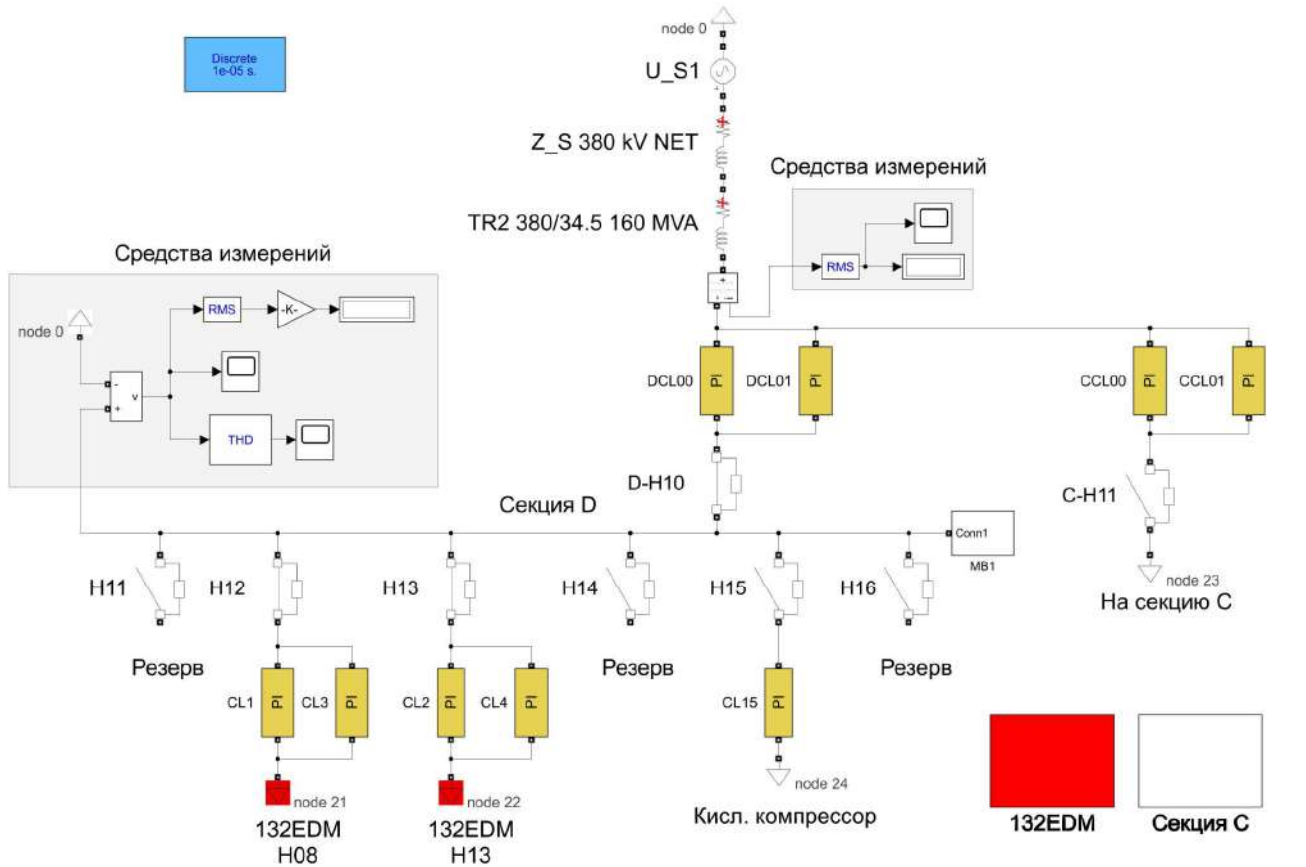
Разработка комплексных имитационных моделей осуществлялась в среде Matlab-Simulink на основе уже известных положений, подробно описанных в работах [46, 126-133]. В разработанных моделях были учтены: 1) параметры питающих сетей 110 кВ и 380 кВ (токи и мощности при трёхфазном коротком замыкании в минимальном и максимальном режимах  $I_{K3.3\phi.110} = 12,7 - 23,6$  кА,  $S_{K3.3\phi.110} = 2527 - 4695$  МВА и  $I_{K3.3\phi.380} = 9,2 - 11,8$  кА,  $S_{K3.380} = 6055 - 7767$  МВА соответственно); 2) параметры сетевых трансформаторов 110/10 кВ, 380/34,5 кВ и токоограничительных реакторов; 3) параметры кабельных линий 10 кВ и 34,5 кВ, отходящих от заводских ГПП до распределительных подстанций, а также всех кабельных линий, отходящих РП к другим высоковольтным приёмникам; 4) параметры главных электроприводов клетей станов холодной и горячей прокатки; 5) параметры других значимых электроприемников цеховых РП с упрощенным представлением в виде пассивных активно-индуктивных нагрузок с фиксированными параметрами. Используемые при имитационном моделировании основные параметры исследуемых объектов представлены в приложениях А и Б.

*Имитационная модель системы электроснабжения и электроприводов с ПЧ-АВ стана горячей прокатки ЗАО «ММК Metalurji»*

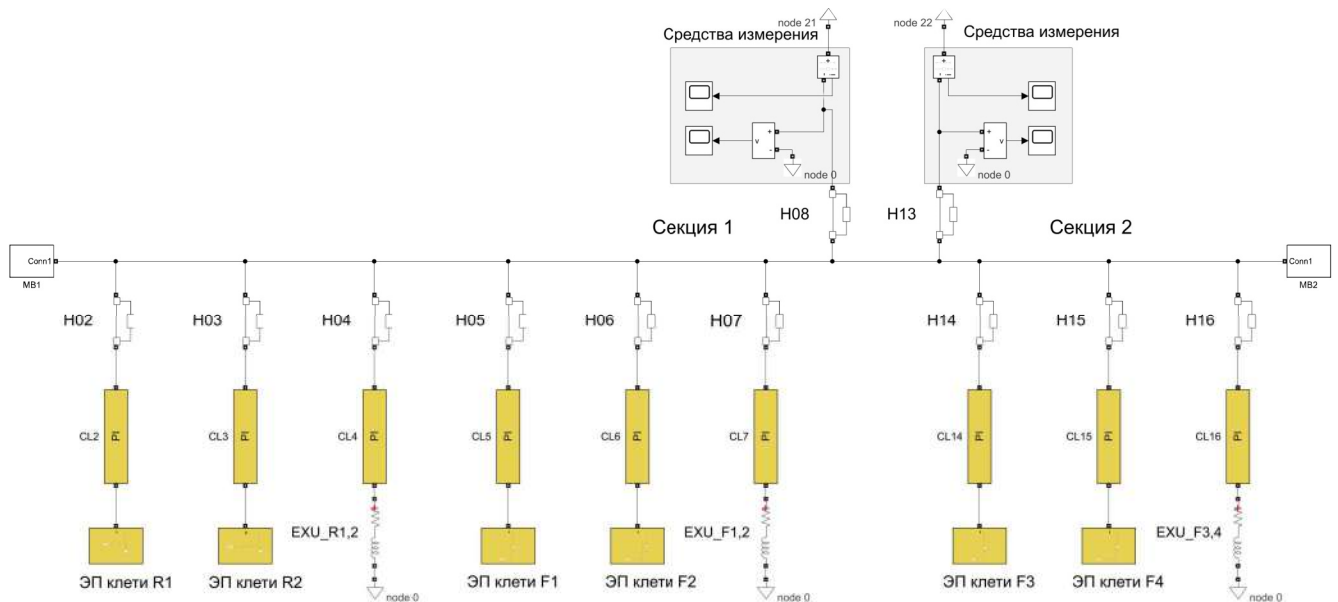
На рисунке 3.5 представлена разработанная имитационная модель для системы электроснабжения стана горячей прокатки 1750 ЗАО «ММК Metalurji». Данная модель с целью упрощения и ускорения расчётов на ЭВМ выполнена в однофазном исполнении при допущении идеальной симметрии фазных напряжений.

В ряде работ при моделировании систем электроснабжения и ПЧ-АВ используются различные упрощённые подходы. Так, например, в трудах [35,103,119] при оценке влияния работы ПЧ-АВ на питающую сеть, АВ моделировались в виде источников ЭДС. В некоторых работах для оценки улучшенных СУ в динамических режимах ЭП ПЧ-АВ моделируют в виде передаточных функций [134]. Отмеченные методы моделирования не подходят для решения задач данной работы. Для получения корректных результатов при исследованиях усовершенствованной СУ АВ с динамическими таблицами углов переключения имитационное моделирование ПЧ-АВ необходимо проводить на подробной трёхфазной модели, рисунок 3.6. В связи с этим, была выполнена интеграция подробных имитационных моделей ПЧ-АВ в однофазную имитационную модель системы электроснабжения стана. В трёхфазной части комплексной имитационной модели, имитирующей каждый ПЧ-АВ, две фазы напряжения воспроизводятся путём смещения сигнала фазы А на  $120^\circ$  и  $240^\circ$  и задания полученных сигналов на два дополнительных источника ЭДС. Данное решение позволит производить как исследования динамических режимов работы усовершенствованной СУ АВ при смене таблиц углов переключения, так и оценку её эффективности с точки зрения улучшения ПКЭ во внутриводской системе электроснабжения.

Для проверки адекватности имитационной модели необходимо сравнить результаты расчётов, полученных с её использованием, с экспериментальными



а)



б)

Рисунок 3.5 - Имитационная модель системы электроснабжения и электроприводов с ПЧ-АВ стана горячей прокатки ЗАО «ММК Metalurji»:

а) общий вид, б) часть модели, воспроизводящая РП 132EDM



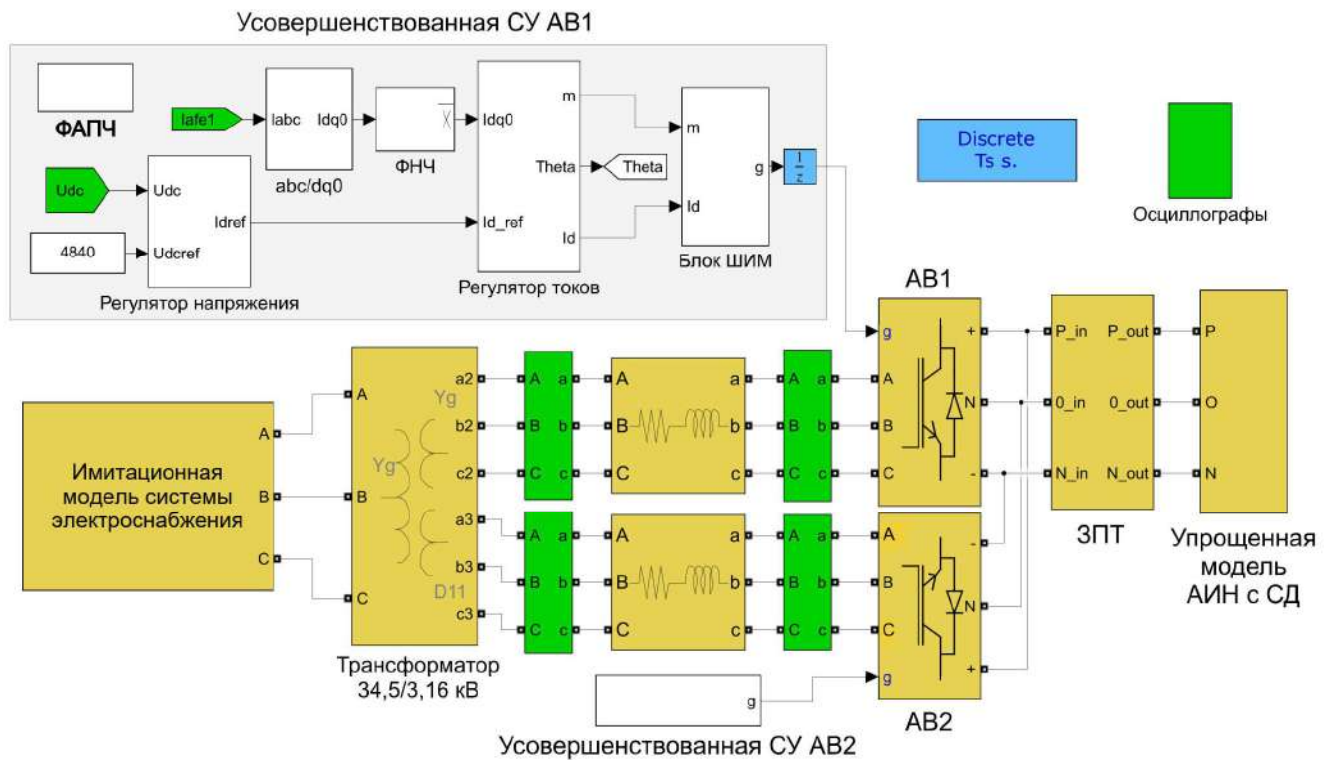


Рисунок 3.6 – Имитационная модель ПЧ-АВ, интегрированная в комплексную имитационную модель

данными. Для выполнения этой задачи требуется рассчитать таблицы углов переключения силовых ключей АВ по методу ШИМ с УВГ, полностью аналогичные аналогичным применяемым в АВ электроприводов объекта исследования. В главе 2 было определено, что в АВ применяется ШИМ с УВГ с 5 переключениями за  $1/4$  периода и удалением 11, 13, 23, 25 гармоник. Ранее в среде Matlab была разработана программа [135], позволяющая производить поиск решений уравнения (1.6) с применением встроенной функции *fsolve*. С её помощью было определено наличие 18 возможных начальных значений углов переключения для указанных условий. Отыскание искомого варианта можно произвести путём расчёта таблиц углов переключения для всех начальных значений и проверке каждого из них на соответствие экспериментальным результатам путём моделирования. Однако, такой вариант поиска требует значительных временных затрат. Иной способ заключается в определении углов переключения силовых ключей по осциллограммам мгновенных значений токов АВ, записанных с высокой частотой дискретизации [103]. Рассчитанные в максимально возможном диапазоне изменения

коэффициента модуляции таблицы углов переключения силовых ключей АВ аналогичные исходным представлены в приложении В.

На рисунке 3.7 показано сравнение двух частотных характеристик сети относительно шин секции D 51EDM, полученных на основе экспериментальных данных и с использованием имитационной модели системы электроснабжения ЗАО «ММК Metalurji». Оценка адекватности полученных результатов производилась путём определения абсолютных  $\Delta Z_{рез.}$  и относительных  $\delta Z_{рез.}$  разностей экстремума импеданса для двух характеристик  $Z(f)$ . Кроме того, были получены значения абсолютных  $\Delta f_{рез.}$  и относительных  $\delta f_{рез.}$  разностей частоты пика резонанса. Учитывая, что  $\delta Z_{рез.} = 2,03 \%$  и  $\delta f_{рез.} = 1,03 \%$ , можно отметить их высокую сходимость полученной на имитационной модели частотной характеристики с экспериментальной.

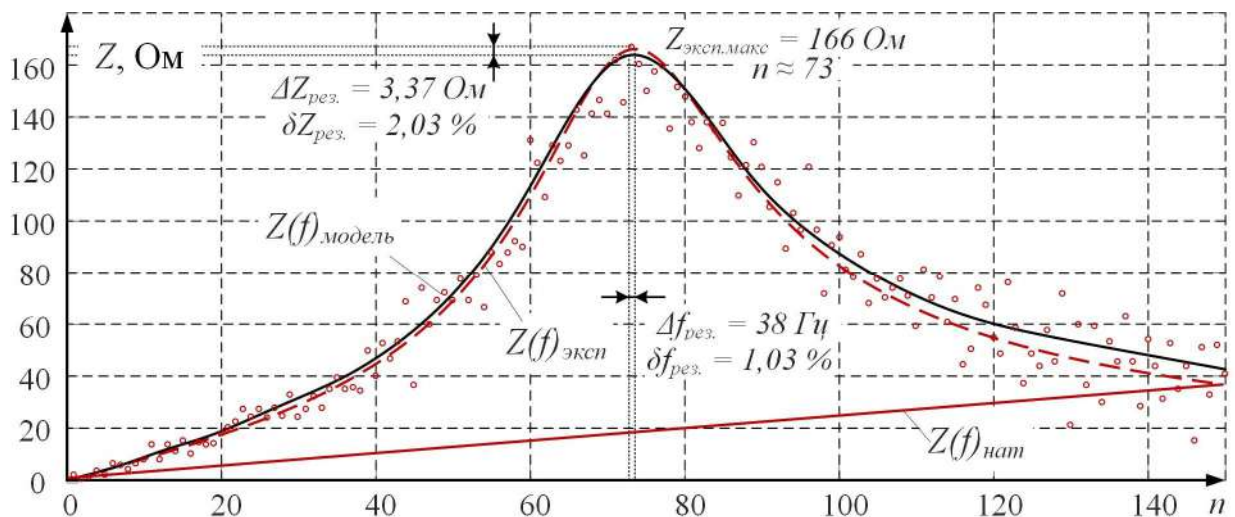


Рисунок 3.7 – Сравнение частотных характеристики внутризаводской сети ЗАО «ММК Metalurji» относительно секции D ЗРУ-34,5 кВ 51EDM, полученных на имитационной модели и расчётным путём по экспериментальным данным

На рисунке 3.8 выполнено сравнение токов электропривода чистовой клетки 1, полученных на имитационной модели с применением ранее рассчитанных значений углов переключения, с экспериментальными осциллограммами. Для корректности анализа величина эквивалентного источника тока, моделирующего

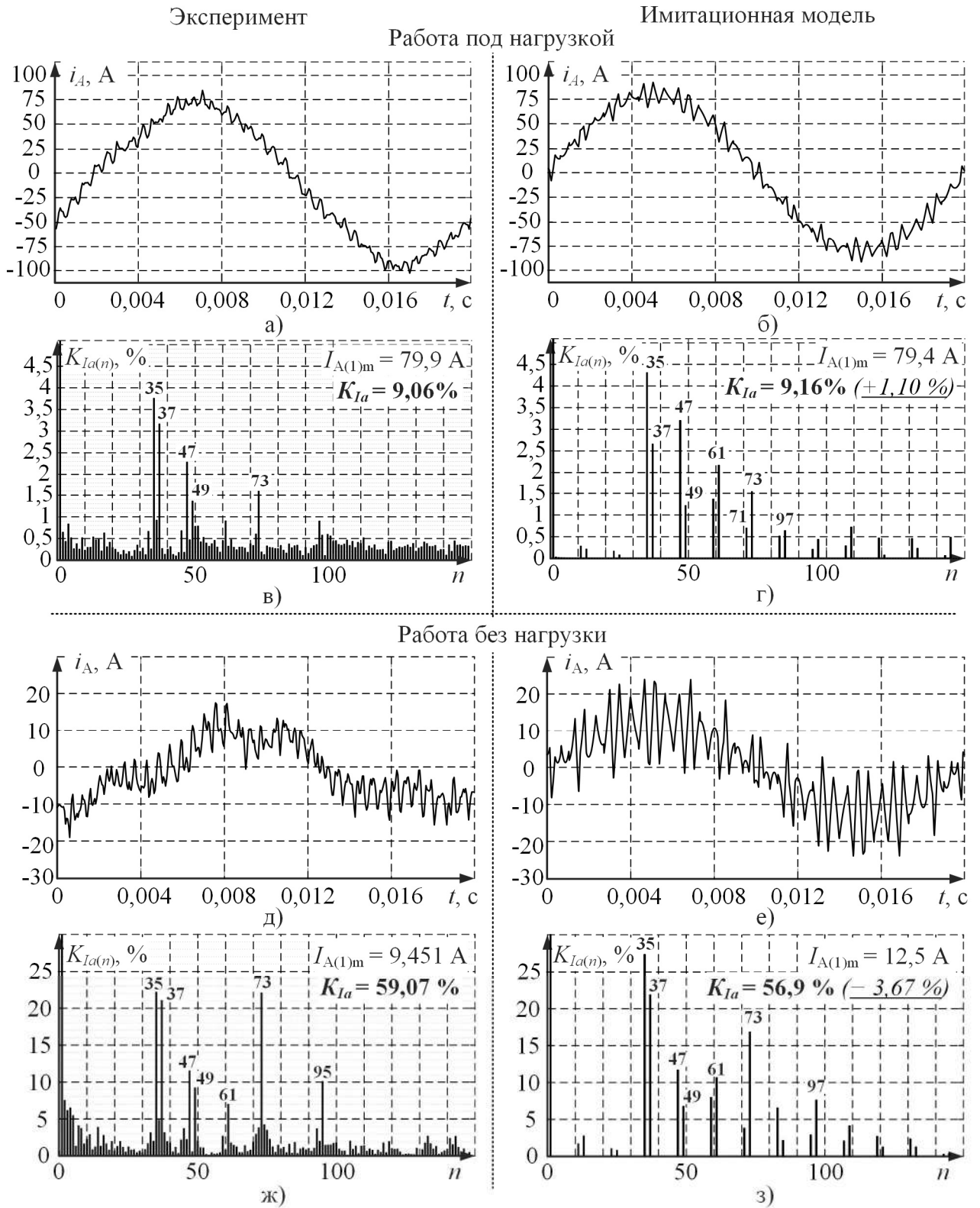


Рисунок 3.8 – Сравнение токов фазы А электропривода чистой клетки 1 и их гармонического состава, полученных на комплексной имитационной модели (б,г,е,з) и экспериментальным путём (а,в,д,ж), для режимов работы под нагрузкой (а-г) и без (д-з)

АИН с СД электропривода, задавалась таким образом, чтобы значение основной гармоники тока, потребляемого электроприводом, соответствовало экспериментальному. В гармонических спектрах анализируемых токов присутствуют значимые высшие составляющие с одинаковыми номерами приблизительно одного уровня. Также анализировалась величина  $\Delta K_I$ , значение которой не превышает допустимого уровня для технических расчётов в 5%. Учитывая, что во всех АВ ЭП клеток стана горячей прокатки применяется ШИМ с УВГ с одинаковыми настройками, проведение сравнительного анализа только для одного электропривода является достаточным.

На рисунках 3.9 и 3.10 произведён сравнительный анализ адекватности результатов имитационного моделирования для напряжений и токов секции D ЗРУ-34,5 кВ ГПП 51EDM для двух режимов работы стана горячей прокатки. Величины нагрузок электроприводов задавались с учётом рисунка 2.8 таким образом, чтобы получить приблизительно равное значение величины первой гармоники. Осциллограммы напряжений и токов, записанных во время экспериментальных исследований, представлены для трёх фаз. Однако, в связи с использованием однофазной имитационной модели системы электроснабжения здесь и далее напряжения и токи для различных участков распределительных систем электроснабжения предприятий будут приводиться только для фазы А.

Проведённый сравнительный анализ свидетельствует о хорошей сходимости результатов имитационного моделирования с экспериментальными данными, что подтверждает адекватность разработанной имитационной модели системы электроснабжения и электроприводов с ПЧ-АВ прокатного стана ЗАО «ММК Metalurji». В дальнейшем разработанная имитационная модель будет использована для оценки эффективности усовершенствованной СУ АВ при использовании оптимальных таблиц углов переключения силовых ключей для каждого режима работы электропривода.

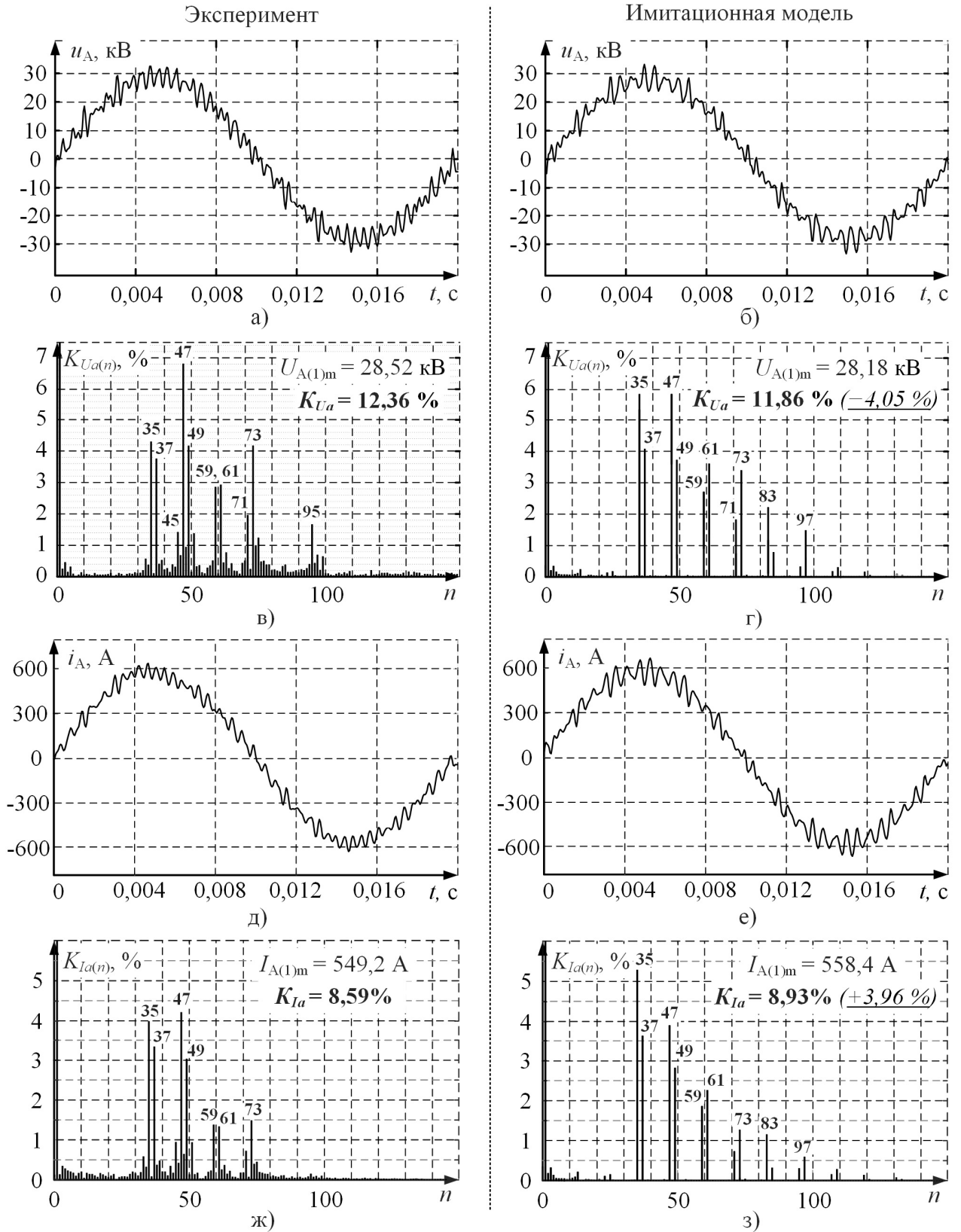


Рисунок 3.9 – Сравнение напряжений и токов фазы А секции D ЗРУ-34,5 кВ ГПП 51EDM и их гармонического состава, полученных на комплексной имитационной модели (б,г,е,з) и экспериментальным путём (а,в,д,ж), при работе стана горячей прокатки

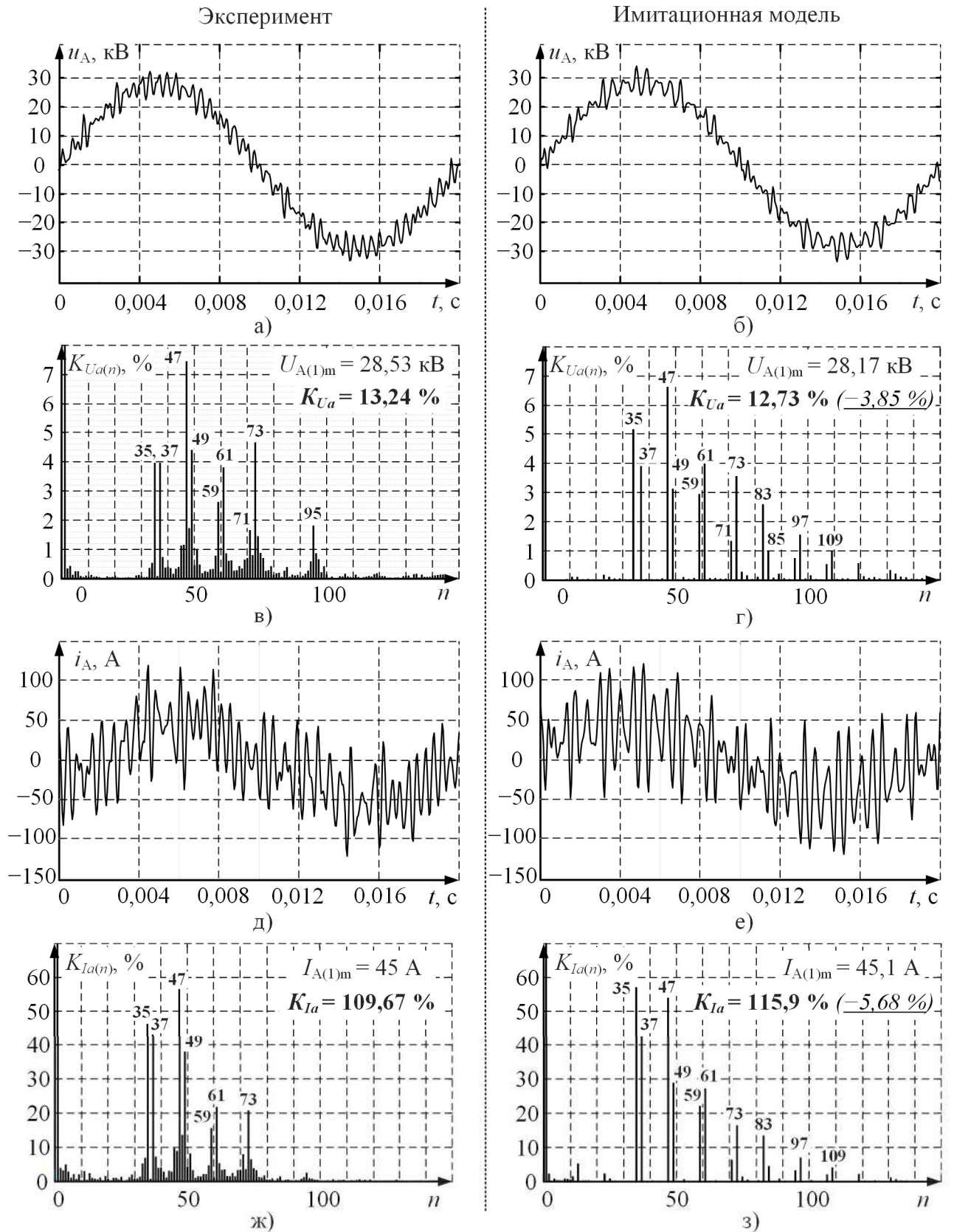


Рисунок 3.10 – Сравнение напряжений и токов фазы А секции D ЗРУ-34,5 кВ ГПП 51EDM и их гармонического состава, полученных на комплексной имитационной модели (б,г,е,з) и экспериментальным путём (а,в,д,ж), при простое стана



*Имитационная модель системы электроснабжения и электроприводов с ПЧ-АВ стана холодной прокатки ЧерМК ПАО «Северсталь»*

Аналогичным образом была разработана имитационная модель системы электроснабжения района ГПП-2 ЧерМК, от которой получают питание электропривода стана холодной прокатки через РП-19. Общий вид модели, разработанной в среде Matlab-Simulink, представлен на рисунке 3.11. Данная модель является дальнейшим развитием имитационной модели, описанной в работах [4,136,137].

На рисунок 3.12 отображены частотные характеристики сети относительно секций 1 и 2 ГПП-2 при их параллельной работе от 2Т, полученные двумя способами: 1) путём деления значений высших гармонических составляющих записанного при проведении экспериментальных исследований напряжения  $K_{U(n)}$  на на высшие составляющие тока  $K_{I(n)}$  с аналогичными номерами; 2) с использованием инструмента «Impedance Measurement» на имитационной модели в среде Matlab-Simulink. Данный режим электроснабжения предприятия является основным, поэтому здесь и далее рассматривается именно он. Также, как для предыдущей имитационной модели, оценка адекватности производилась с помощью абсолютных  $\Delta Z_{рез.}$  и относительных  $\delta Z_{рез.}$  разностей экстремума импеданса, абсолютных  $\Delta f_{рез.}$  и относительных  $\delta f_{рез.}$  разностей частоты пика резонанса для двух характеристик  $Z(f)$ . Величина  $\delta Z_{рез.}$  составила 4,89 %. Что может быть обусловлено в том числе погрешностью расчётной по экспериментальным данным частотной характеристики, т.к. основной резонанс представлен в относительно узком диапазоне частот  $f_{рез.} = 1250 \dots 1850$  Гц. Характеристика  $Z(f)$ , полученная при моделировании, показывает хорошую сходимость с расчётной в области основного резонанса.

Как и в предыдущем случае для осуществления корректной проверки адекватности имитационной модели необходимо рассчитать таблицы углов переключения силовых ключей АВ по методу ШИМ с УВГ, полностью аналогичные применяемым в АВ электроприводов клеток стана №№1-4 и моталки.

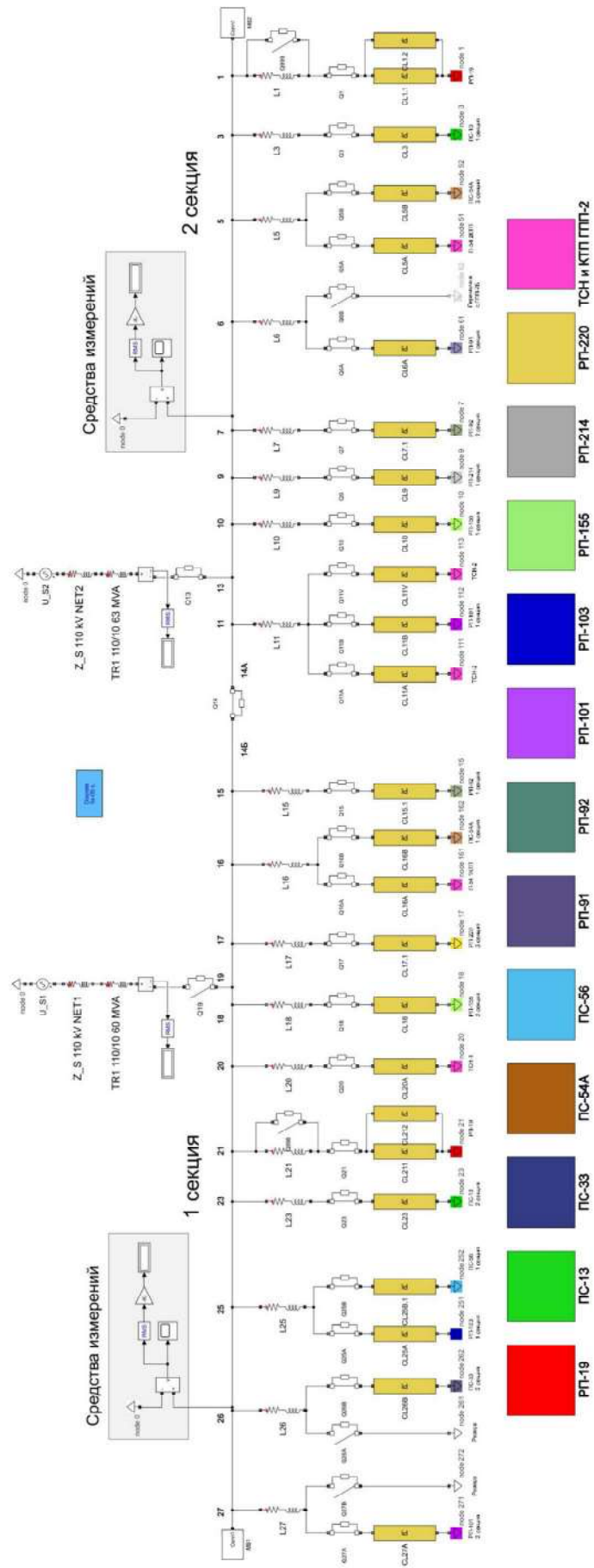


Рисунок 3.11 - Имитационная модель системы электроснабжения и электроприводов с ПЧ-АВ стана холодной прокатки ЧерМК ПАО «Северсталь»

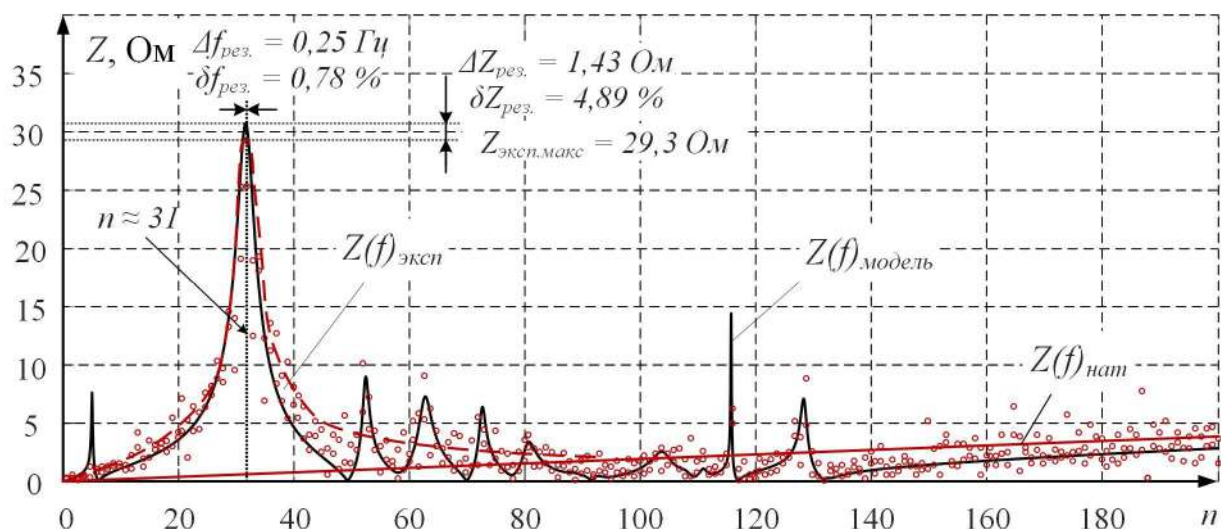


Рисунок 3.12 – Сравнение частотных характеристики секций 1 и 2 ЗРУ-10 кВ ГПП-2 при их параллельной работе, полученных на имитационной модели и расчётным путём по экспериментальным данным

Восстановленные таблицы углов переключения, максимально-аналогичные исходным, приведены в приложении В.

С использованием указанных наборов углов переключений АВ на комплексной имитационной модели были получены мгновенные значения тока фазы А электроприводов клетки 1, 2 и моталки с величиной первой гармоники приблизительно равной экспериментальной. На рисунке 3.13 произведено сравнение полученных сигналов и их гармонического состава с экспериментальными из главы 2. В гармонических спектрах анализируемых токов всех рассматриваемых электроприводов присутствуют значимые гармонические составляющие с одинаковыми номерами. Несмотря на то, что величины отдельных гармоник тока, полученного на модели, в некоторых случаях имеют отклонения от значений экспериментальных, величина  $\Delta K_I$  не превышает допустимого уровня для технических расчётов в 5%.

На рисунке 3.14 произведён сравнительный анализ результатов имитационного моделирования для напряжений и токов секции 1 и 2 ЗРУ-10 кВ ГПП-2 для двух режимов работы стана холодной прокатки – при прокатке сляба и при простое. Величины нагрузок электроприводов стана задавались с учётом



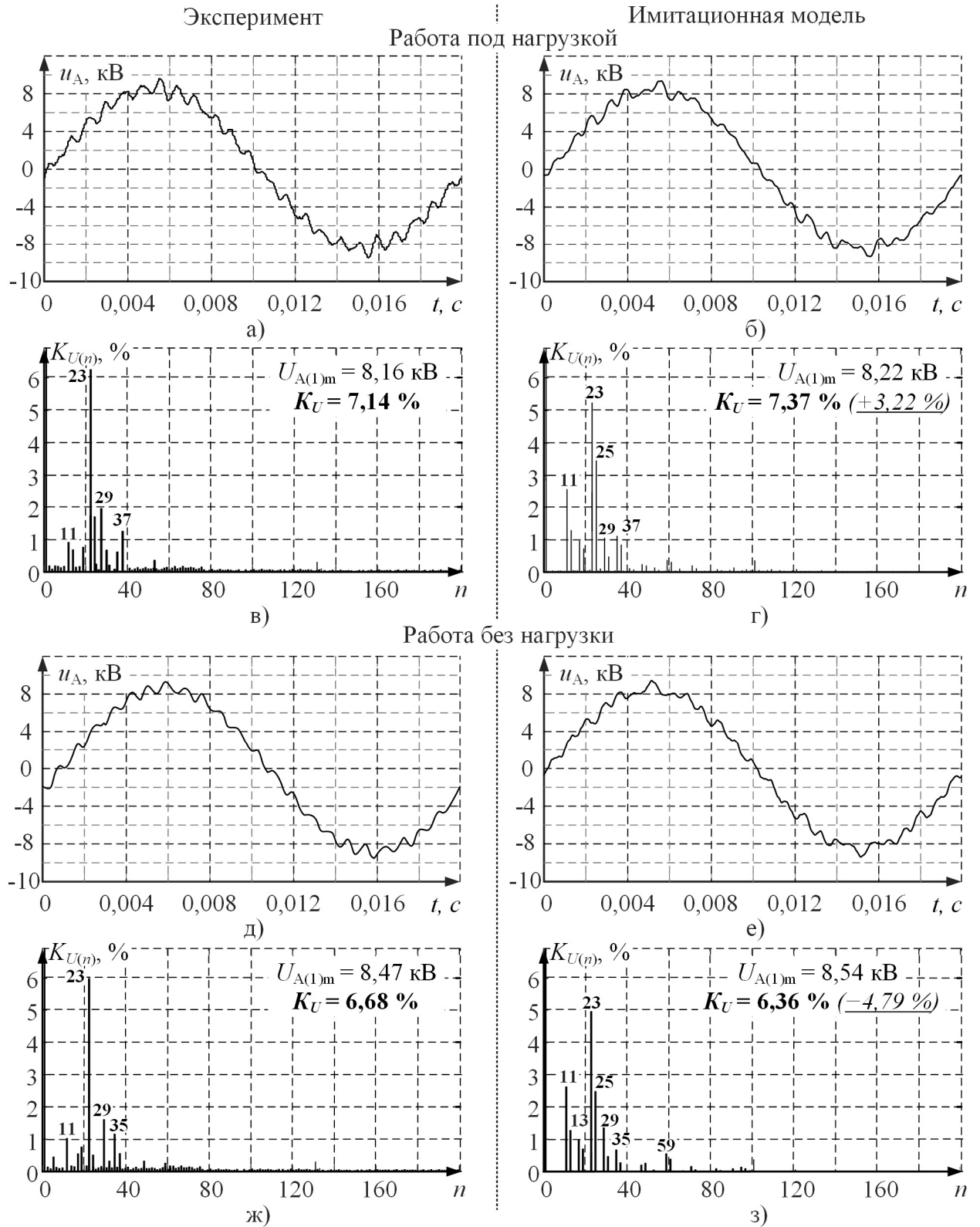


Рисунок 3.14 – Сравнение напряжений секций 1 и 2 ЗРУ-10 кВ ГПП-2 и гармонического состава напряжения фазы А, полученных на комплексной имитационной модели (б,г,е,з) и экспериментальным путём (а,в,д,ж), при работе стана холодной прокатки (а-г) и при простое стана (д-з)

значений, представленных на рисунке рисунка 2.13. Величина  $\Delta K_U$  для рассмотренных режимов работы не превышает значения в 5%, что подтверждает адекватность разработанной имитационной модели системы электроснабжения и электроприводов с ПЧ-АВ стана холодной прокатки ЧерМК ПАО «Северсталь».

### **3.4. Оценка влияния динамической смены таблиц усовершенствованной СУ АВ на регулируемые параметры**

Как уже было отмечено ранее, для усовершенствованной СУ АВ необходимо произвести настройку блока сравнения с целью минимизации возмущающих воздействий на регулируемые параметры при динамической смене таблиц. В тоже время задержки на переход с одного набора углов переключения на другой не должны вызывать недопустимые режимы работы АВ.

Блок сравнения в разработанной имитационной модели способен формировать сигнал разрешения на смену таблицы по двум предложенным условиям: 1) отсутствию необходимости дополнительных коммутации силовых ключей; 2) необходимость переключения одного ключа. Первый вариант является приоритетным с точки зрения минимизации возмущающих воздействий, поэтому исследуем сначала работу ПЧ-АВ при использовании данного условия.

Исследования работы усовершенствованной СУ АВ [138-140] производились на разработанной имитационной модели системы электроснабжения и электроприводов с ПЧ-АВ стана холодной прокатки ЧерМК ПАО «Северсталь», рисунок 3.11. В системе управления АВ электропривода моталки стана холодной прокатки используется ШИМ с УВГ с 9 переключениями за  $1/4$  периода и удалением 5, 7, 11, 13, 17, 19 гармоник. Для исследования работы электропривода при смене таблиц усовершенствованной СУ АВ были рассчитаны дополнительные наборы значений углов коммутации силовых ключей ШИМ с УВГ с 11 и 13 переключениями за  $1/4$  периода в соответствии с принципами, изложенными в главе 1.



Исходная (1 таблица) будет применяться в имитационной модели при нагрузках эквивалентных номинальным. Таблица 2 с частотой коммутации 550 Гц – при работе со сниженной нагрузкой. Таблица 3 с частотой коммутации 550 Гц – при работе с токами в диапазоне от 0 до половины от номинального значения.

Характер изменения нагрузки электропривода моталки, рассмотренный в главе 2, был учтён при проведении моделирования, но сжат по времени до 10 секунд. На данном этапе исследований в первую очередь представляет интерес влияние смены таблиц на регулируемые параметры электропривода. Поэтому при имитационном моделировании были сделаны описанные выше допущения.

На рисунках 3.15 и 3.16 показаны осциллограммы линейных напряжений на входе АВ и фазных токов при динамической смене таблиц системой управления, а также сигналы номера требуемого набора углов  $n'_i$  и логический сигнал разрешения перехода  $S_w$ .

Работа блока сравнения с условием отсутствия дополнительных коммутаций полупроводниковых вентилях при смене таблиц углов переключений не вызывает бросков фазных токов АВ. В тоже время в некоторых случаях происходит изменение величин первой гармоники на одном периоде фазных токов АВ, что вызывает небольшие переходные процессы в контуре регулирования токов. Максимальное изменение величины тока при переходных процессах определялось по полученным осциллограммам и составило для рассматриваемых случаев  $\delta i_{П.П.Макс} = 23,6 \%$ . Длительность переходных процессов не превышала 100 мс.

Оценивая разность времени между сменой номера требуемой таблицы  $n'_i$  и «1» логического сигнала разрешения перехода  $S_w$  можно оценить величину возникающей задержки на переход  $\Delta t$  при работе блока сравнения с условием 1. В данных опытах было зафиксировано максимальное значение величины  $\Delta t = 0,1$  мс. В половине случаев смена таблиц осуществлялась без задержек.

Во второй главе было отмечено, что объекты экспериментальных исследований были реализованы на базе ПЧ-АВ серии ACS6000 фирмы АВВ. Данные преобразователи допускают перегрузку в 150 % длительностью 60 секунд каждые 600 секунд. Учитывая этот факт, величина задержки  $\Delta t_{Макс} = 0,1$  мс является незначительной с точки зрения сохранения теплового баланса преобразователя при повышенных частотах коммутации силовых ключей.

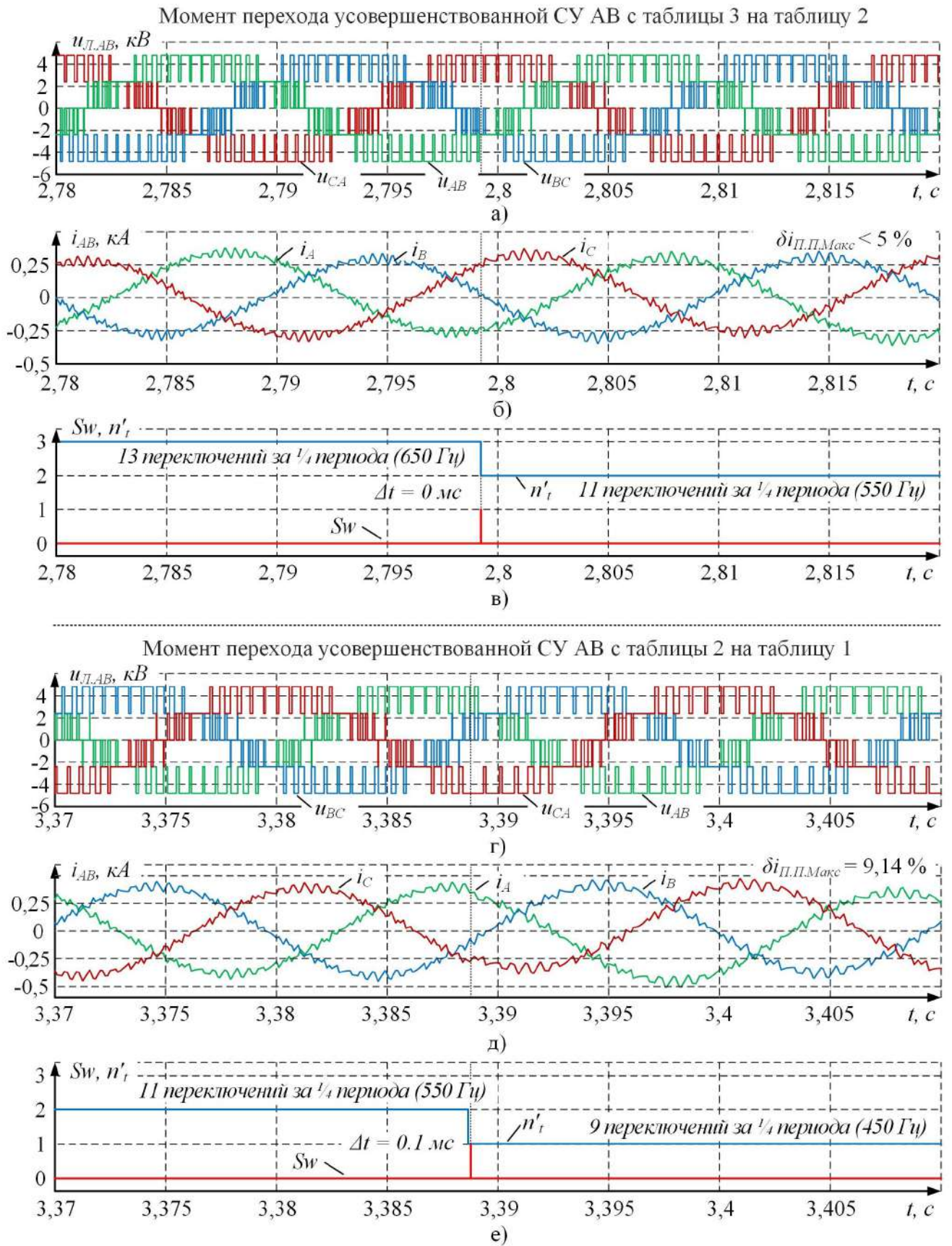


Рисунок 3.15 – Осциллограммы линейных напряжений (а,г) и токов АВ (б,д) с усовершенствованной СУ при смене таблиц углов переключения (в, е)



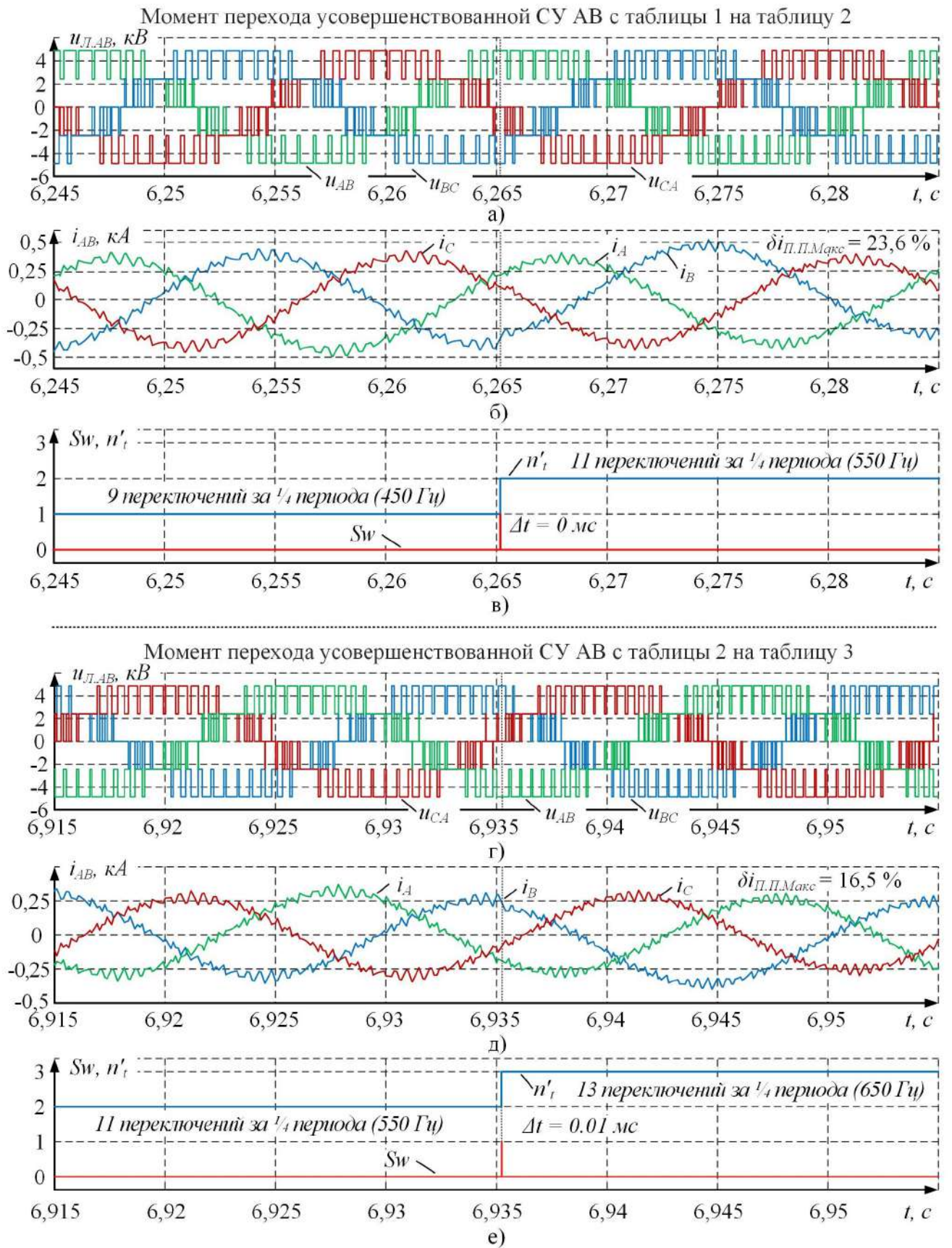


Рисунок 3.16 – Осциллограммы линейных напряжений (а,г) и токов АВ (б,д) с усовершенствованной СУ при смене таблиц углов переключения (в, е)

Исследования работы усовершенствованной СУ производились при высоких частотах коммутации силовых ключей и для 6-пульсной схемы питания. В случае СУ АВ для 12-пульсной схемы питания ПЧ и при низких частотах коммутации полупроводниковых вентилях задержки на переключение будут выше. Следует оценить их величину, а также проанализировать влияние динамической смены таблиц усовершенствованной СУ АВ на регулируемые параметры электропривода.

Для выполнения указанной задачи имитационная модель предлагаемой СУ АВ была включена в состав модели ПЧ-АВ с 12-пульсной схемой питания. При моделировании использовались параметры главного электропривода клетки 2 стана холодной прокатки ЧерМК ПАО «Северсталь», рассмотренного в главе 2.

В системе управления АВ электропривода клетки 2 применяется ШИМ с УВГ с 7 переключениями за  $1/4$  периода и удалением 5, 7, 11, 13, 17, 19 гармоник. Для исследования работы ПЧ при смене таблиц усовершенствованной СУ АВ были рассчитаны дополнительные наборы значений углов коммутации IGCT-тиристоров по методу ШИМ с УВГ с 3 и 5 переключениями за  $1/4$  периода. Очевидно, что практическая целесообразность применения таблиц с более низкой частотой коммутации, если не происходит увеличение допустимых нагрузок, отсутствует. Аналогично предыдущему эксперименту таблицы с более высокой частотой коммутации силовых вентилях применялись при сниженной нагрузке. Также при моделировании был учтён характер изменения нагрузки электропривода клетки 2 за цикл прокатки, аппроксимированный на интервале 10 секунд.

На рисунках 3.17 – 3.20 показаны результаты проведённого имитационного моделирования, а именно: осциллограммы линейных напряжений на входах АВ1, АВ2; фазные токи двух АВ при динамической смене наборов углов переключения системой управления, а также сигналы номера требуемой таблицы  $n'$  и логический сигнал разрешения перехода  $S_w$ .

Также, как и в прошлом эксперименте, смена таблиц усовершенствованной СУ АВ не вызывает бросков тока или значимых возмущающих воздействий на регулируемые параметры. Максимальное значение величины  $\Delta t$  увеличилось в 7 раз и составило 0,7 мс (3,5 % от периода питающего напряжения). Данная величина является незначительной для ухудшения режимов работы преобразователя.



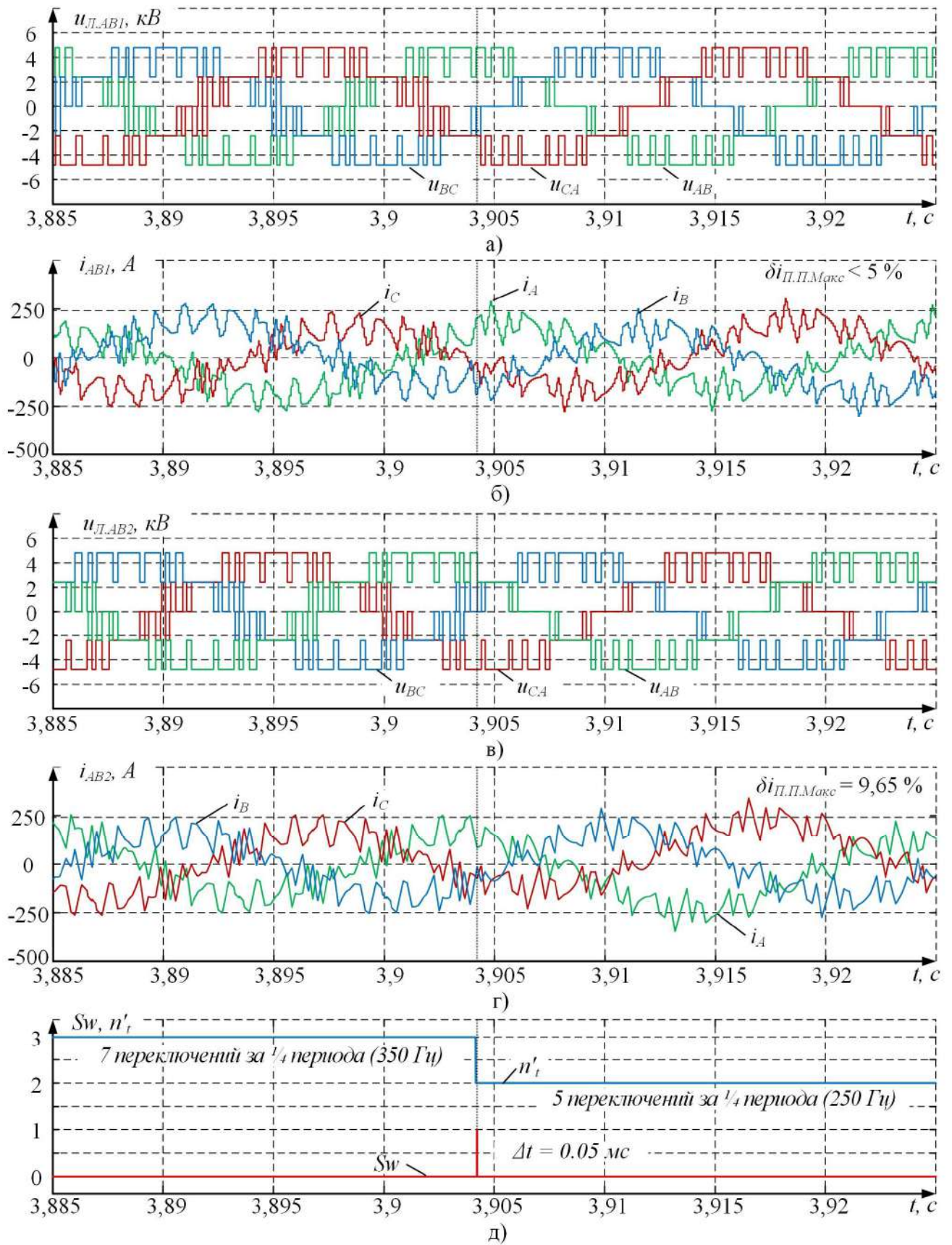


Рисунок 3.17 – Осциллограммы линейных напряжений (а,в) и токов АВ (б,г) с усовершенствованной СУ в момент смены таблиц углов переключения с 3-ей на 2-ую (д) при 12-пульсной схеме питания ПЧ

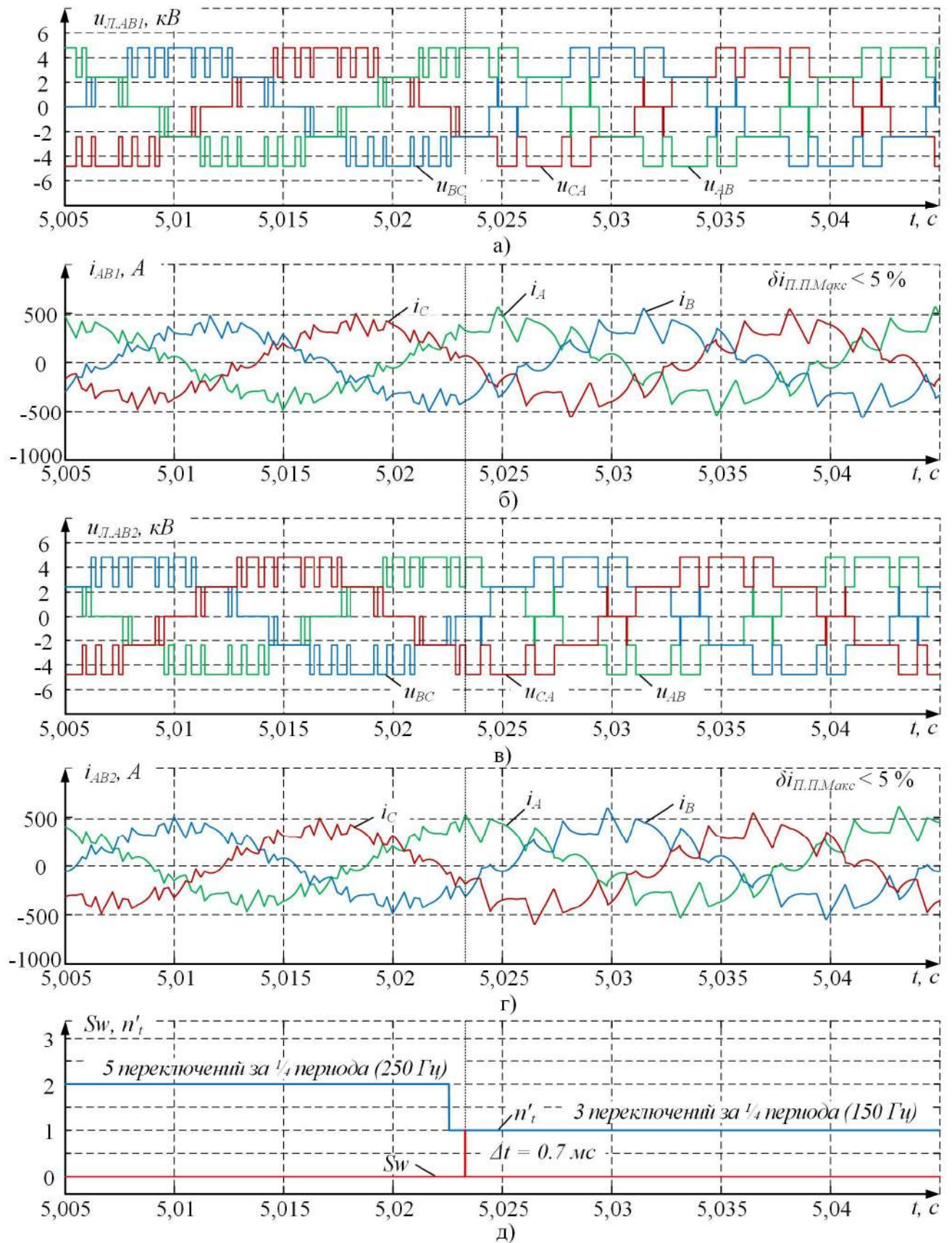


Рисунок 3.18 – Осциллограммы линейных напряжений (а,в) и токов АВ (б,г) с усовершенствованной СУ в момент смены таблиц углов переключения со 2-ой на 1-ую (д) при 12-пульсной схеме питания ПЧ



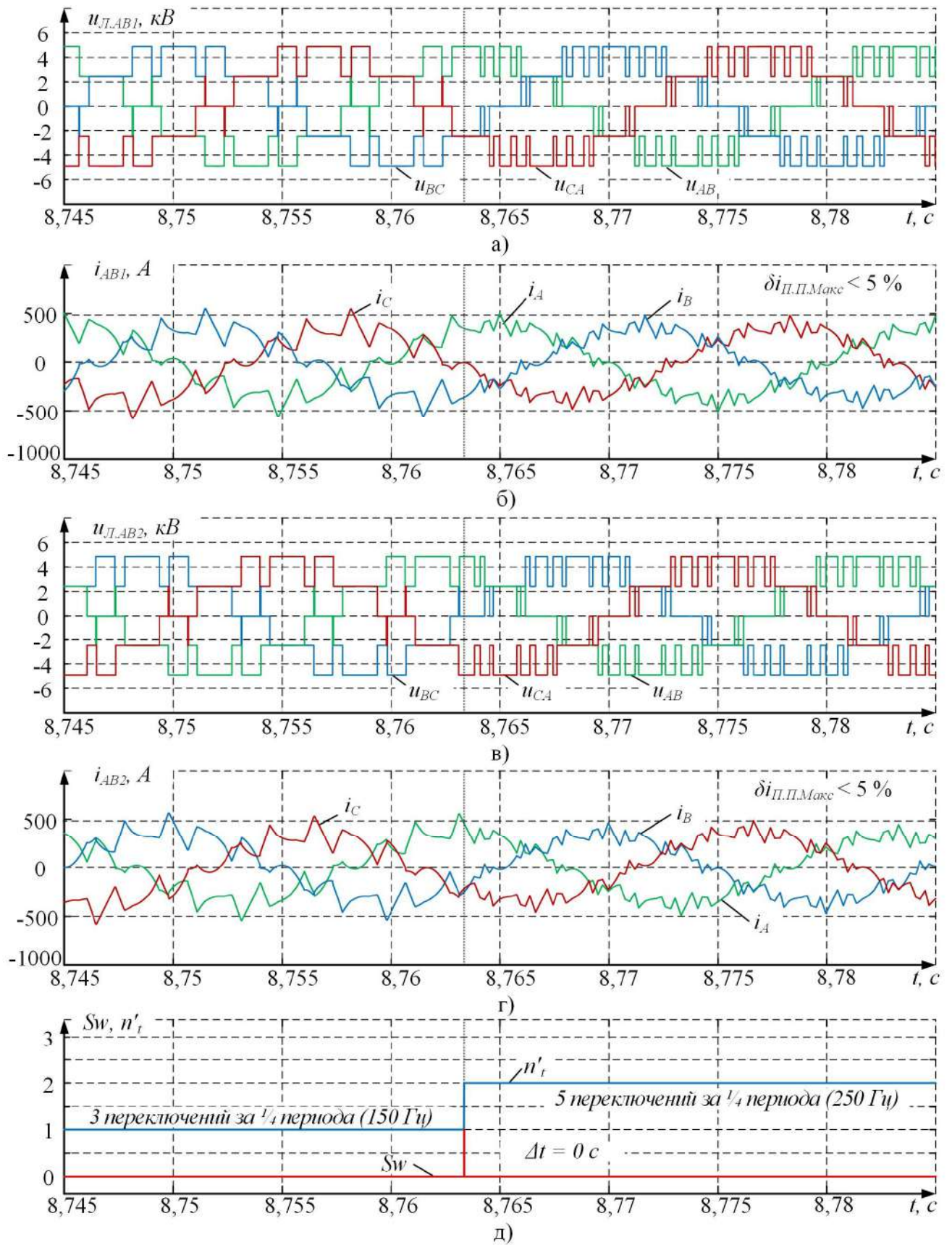


Рисунок 3.19 – Осциллограммы линейных напряжений (а,в) и токов АВ (б,г) с усовершенствованной СУ в момент смены таблиц углов переключения с 1-ой на 2-ую (д) при 12-пульсной схеме питания ПЧ

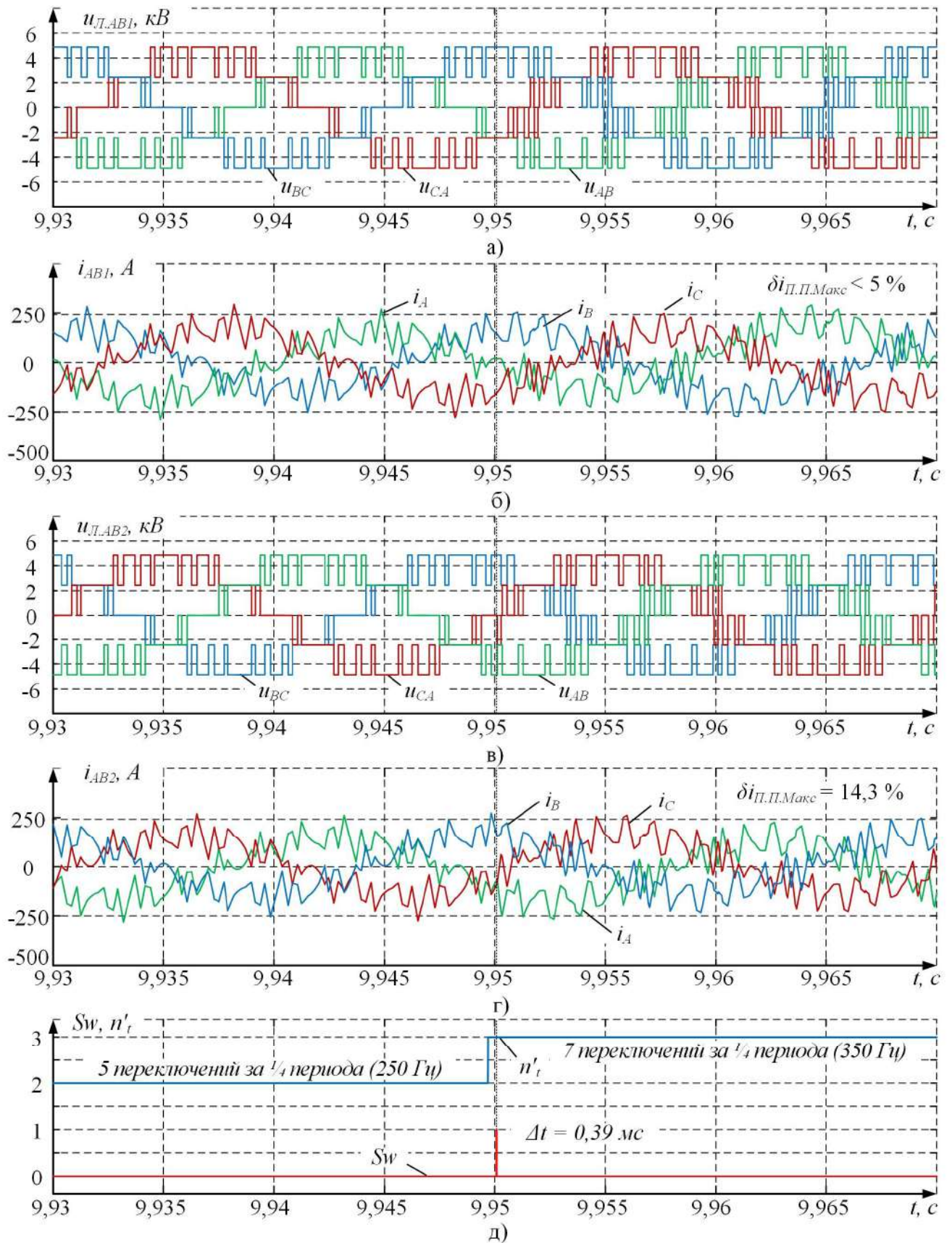


Рисунок 3.20 – Осциллограммы линейных напряжений (а,в) и токов АВ (б,г) с усовершенствованной СУ в момент смены таблиц углов переключения со 2-ой на 3-ю (д) при 12-пульсной схеме питания ПЧ

### 3.5. Выводы по главе 3

1. Разработана усовершенствованная система управления активного выпрямителя с динамическим выбором таблицы углов переключения силовых ключей. Предлагаемая система управления АВ отличается от уже существующих наличием возможности перехода на заранее рассчитанные наборы углов переключения полупроводниковых вентилей АВ с отличными настройками в зависимости от текущего режима работы электропривода. Разработаны функциональные схемы усовершенствованной СУ АВ при её реализации в случае 6- и 12-пульсной схемы питания ПЧ.

2. Для предлагаемой усовершенствованной СУ АВ была разработана имитационная модель в среде Simulink пакета прикладных программ Matlab. С целью настройки усовершенствованной СУ АВ, а также оценки влияния динамической смены таблиц углов переключения на регулируемые параметры АВ, разработанная имитационная модель была включена в состав имитационных моделей систем электроснабжения и электроприводов с ПЧ-АВ прокатных станков ЗАО «ММК Metalurji» и ЧерМК ПАО «Северсталь». Проведена проверка их адекватности.

3. Результаты имитационного моделирования работы усовершенствованной СУ АВ при динамической смене таблиц углов переключения силовых вентилей показали наличие незначительных возмущающих воздействий на потребляемый ПЧ ток. Доказано, что возникающие задержки на смену наборов углов переключения минимальны и не влияют на устойчивость работы преобразователя.

4. Имитационная модель усовершенствованной СУ АВ с динамическим выбором оптимальных таблиц углов переключения в дальнейшем будет использована при оценке эффективности системы управления с точки зрения улучшения качества электроэнергии в сетях 6-35 кВ с мощными ПЧ-АВ. С этой целью будет проведён дополнительный расчёт оптимальных наборов углов переключения с учётом критериев физической реализуемости и режимов работы электропривода.



## **ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ТАБЛИЦ УГЛОВ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ СИЛОВЫХ КЛЮЧЕЙ АКТИВНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ С УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ**

Как было отмечено в главе 1, увеличение частоты коммутации силовых ключей при использовании ШИМ с УВГ или ПВГ позволяет удалять/подавлять большее число гармоник. Однако, при работе с увеличенной частотой коммутации повышаются потери энергии в полупроводниковых вентилях, что может привести к их перегреву.

Разработанная усовершенствованная СУ АВ с динамическим выбором таблиц углов переключения позволяет применять заранее рассчитанные наборы значений углов с повышенной частотой коммутации IGBT-тиристорov при работе электропривода со сниженной нагрузкой. Благодаря этому появляется возможность значительно улучшить ЭМС ПЧ-АВ с питающей сетью в некоторых режимах работы прокатных станов.

Для обеспечения наилучших показателей ЭМС, а также стабильной работы ПЧ требуется разработка методики расчёта оптимальных таблиц углов переключения полупроводниковых вентиляв АВ с усовершенствованной СУ с учётом критериев физической реализуемости.

### **4.1. Анализ критериев физической реализуемости таблиц углов переключения силовых ключей активного выпрямителя с IGBT-тиристорами**

В ряде исследований приводятся различные варианты наборов углов переключения силовых ключей по методам ШИМ с УВГ или ПВГ [15,37], рисунок 4.1. Если обратить внимание на характер изменения величин углов переключения, то можно заметить, что их значения могут быть примерно равны на некоторых участках. После пересечения графиков значений отдельных углов друг с другом перестаёт выполняться условие (1.8) из-за чего дальнейшие решения заданной системы уравнений оказываются нереализуемыми, рисунок 4.1 б).

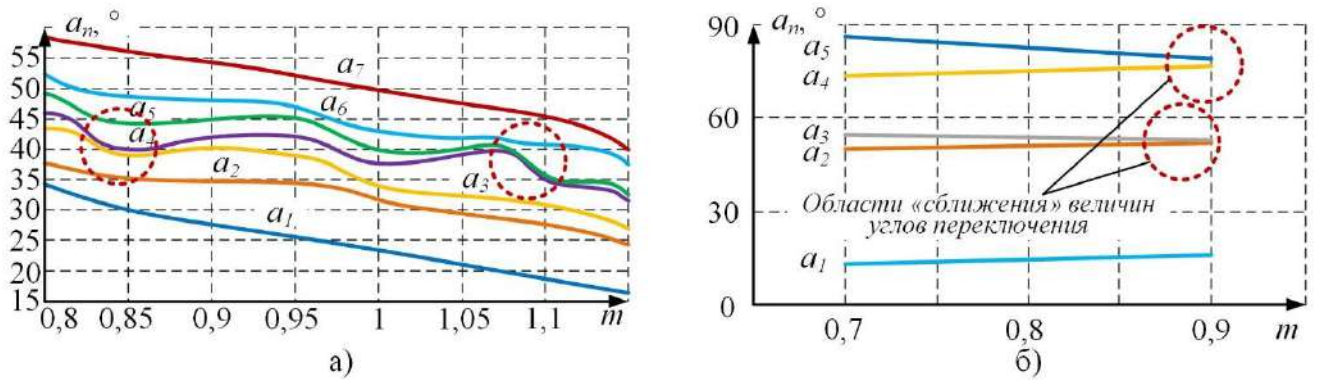


Рисунок 4.1 – зависимости величин углов переключения от коэффициента модуляции для ШИМ с УВГ а) при 7 переключениях, б) 5 переключениях за 1/4 периода

Важно отметить, что полупроводниковые вентили в современных преобразователях не являются идеальными силовыми ключами и обладают определёнными физическими свойствами, которые необходимо учитывать при применении различных алгоритмов ШИМ.

Преобразователи частоты ACS6000, исследуемых в главе 2 электроприводов, выполняются на базе IGCT-тиристоров. В отличие от IGBT-транзисторов IGCT-тиристоры функционируют при значительно более низких частотах коммутации, составляющих обычно 150-550 Гц. Для того, чтобы произвести корректные расчёты углов переключения силовых ключей по методам ШИМ с УВГ или ПВГ необходимо уточнить минимально-допустимую разность между величинами углов.

Производители современного оборудования часто предоставляют только общие сведения о его характеристиках. В случае выхода из строя такого оборудования – специализированная организация должна произвести его полную замену или замену повреждённых модулей, ремонт отдельных узлов не подразумевается. Кроме того, программный код микроконтроллеров преобразователей является закрытым. Данные решения выполняются в рамках секрета производства и предназначены для защиты от копирования конкурентами и увеличения прибыли за счёт продажи оригинальных запасных частей. Однако, из-за этого проведение исследований и внедрение их результатов на действующем оборудовании существенно затрудняются.

В соответствии с техническими спецификациями [141] на IGCT-тиристоры 5SHY 55L4500 и 5SHY 35L4511, производства фирм ABB Switzerland Ltd Semiconductors и Hitachi Energy Ltd, были определены регламентированные минимально-допустимые длительности команд на включенное и отключенное состояние  $t_{on} = t_{off} = 40$  мкс. При частоте питающей сети 50 Гц данная величина, выраженная в электрических градусах, составит  $\Delta a_{min} = 0,72$  °. Для корректной работы АВ при выполнении расчётов наборов углов переключения по методу ШИМ с УВГ или ПВГ требуется обеспечить выполнение указанного критерия.

При применении таблиц углов переключения с увеличенной частотой коммутации полупроводниковых вентилей при работе электропривода со сниженной нагрузкой важно правильное определение значений тока АВ, при которых должен происходить переход с одной таблицы 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 АВ.

В общем случае энергия выделяемая на тиристоре АВ за период питающего напряжения для ШИМ с УВГ может быть определена по формуле:

$$W_T = \frac{U_T I_T}{t_{вкл}} + \frac{N}{2} W_{вкл} + \frac{N}{2} W_{выкл}, \quad (4.1)$$

где  $U_T$  – падение напряжения на тиристоре в открытом состоянии,  $I_T$  – действующее значение тока через тиристор за период питающего напряжения,  $t_{вкл}$  – суммарное время открытого состояния тиристора,  $N$  – число переключений за четверть периода,  $W_{вкл}$  и  $W_{выкл}$  – энергия выделяемая на тиристоре при его открытии и закрытии.

При этом должно выполняться соотношение теплового баланса:

$$W_T t \leq W_{охл.макс}, \quad (4.2)$$

где  $W_{охл.макс}$  – максимальная мощность системы охлаждения АВ.



Проведение детального расчёта с использованием формул (4.1, 4.2) в ряде случаев может быть затруднено из-за отсутствия необходимых данных. В технических спецификациях рассматриваемых тиристоров приводятся величины выделяемой тепловой энергии при их коммутации только для двух случаев лабораторных испытаний. В связи с этим в данной работе был предложен новый упрощённый вариант предварительного определения граничных значений токов для таблиц углов переключения силовых ключей с различной частотой коммутации для учёта ограничений по нагреву.

На рисунке 4.2 показаны графики максимально-допустимого тока IGBT-тиристора 5SHY 55L4500 [141] в зависимости от частоты коммутации: нижняя линия – при температуре окружающей среды  $T_{окр.} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$  и температуре корпуса тиристора  $T_{тир.} < 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; средняя линия – при  $T_{окр.} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $T_{тир.} < 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; верхняя линия отображает ограничение по мощности источника питания драйвера тиристора  $P_{Др.макс} = 130\text{ Вт}$ .

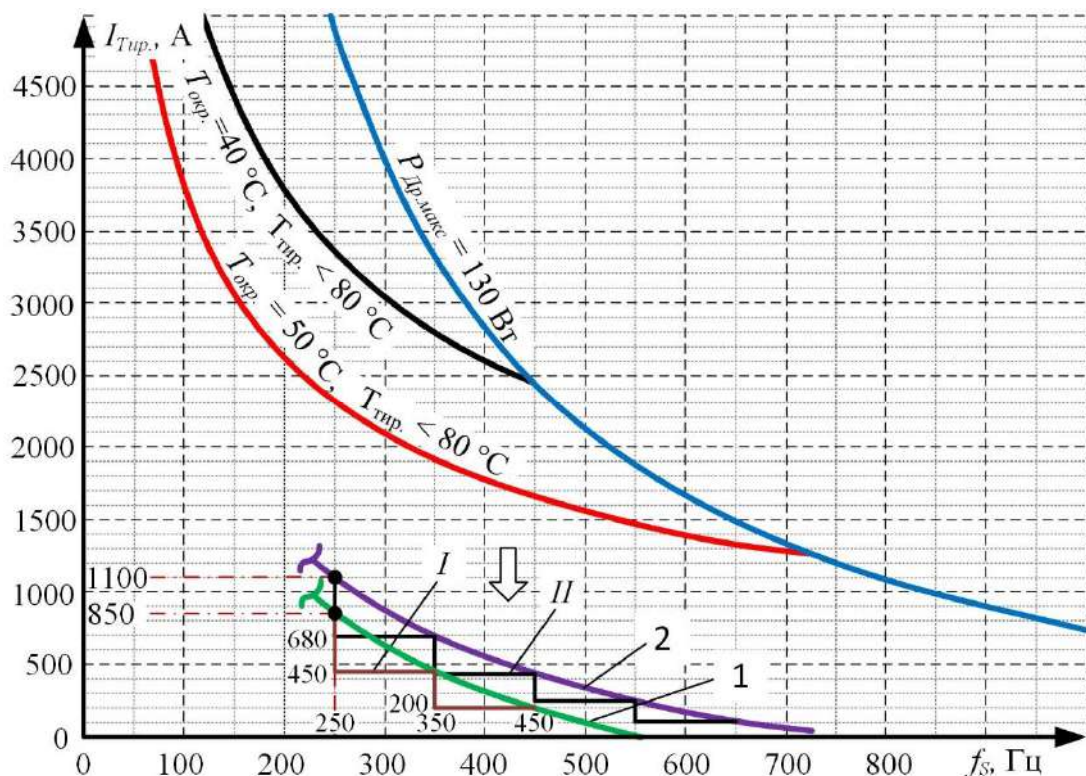


Рисунок 4.2 – Графики максимально-допустимого тока IGBT-тиристора 5SHY 55L4500 в зависимости от частоты коммутации и определение граничных значений токов для таблиц усовершенствованной СУ АВ электроприводов стана горячей прокатки ЗАО «ММК Metalurji»

При разработке преобразователей большой мощности фирмы производители могут применять более мощные тиристоры, рассчитанные на протекание значительных величин токов, а также системы водяного охлаждения различной производительности для отвода выделяемой полупроводниковыми вентилями тепловой энергии. Чтобы учесть эти факторы при расчётах граничных значений токов таблиц усовершенствованной СУ АВ на рисунке 4.2 были отмечены номинальные значения токов АВ главных электроприводов клеток стана горячей прокатки ЗАО «ММК Metalurji». Номинальные значения токов каждого АВ электроприводов черновых клеток равняются 850 А при 5 переключениях силовых ключей за 1/4 периода питающего напряжения (частота коммутации 250 Гц). Для АВ чистовых клеток эта величина составляет 1100 А.

Кривые 1 и 2 повторяющие характер зависимости максимально-допустимого тока I<sub>IGCT</sub>-тиристора от частоты коммутации были проведены через точки, соответствующие номинальным режимам работы АВ. Используя указанные кривые, графическим способом [142] были определены граничные значения токов АВ для различных частот коммутации и построены зависимости I, II. Полученные значения представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты определения граничных значений токов для таблиц усовершенствованной СУ АВ электроприводов стана горячей прокатки ЗАО «ММК Metalurji»

Параметр	АВ ЭП черновых клеток	АВ ЭП чистовых клеток
Номинальное значение тока, А (частота коммутации вентиляей 250 Гц)	850	1100
Максимальная величина тока при частоте коммутации 350 Гц, А	450	680
Максимальная величина тока при частоте коммутации 450 Гц, А	200	440
Максимальная величина тока при частоте коммутации 550 Гц, А	—	240
Максимальная величина тока при частоте коммутации 650 Гц, А	—	200

Аналогичным образом были получены граничные значения токов для таблиц с различной частотой коммутации усовершенствованной СУ АВ при её использовании в АВ электроприводах стана холодной прокатки ЧерМК, рисунок 4.3. Активный выпрямитель в составе электропривода клетки 1 имеет номинальный ток в 2190 А и частоту коммутации полупроводниковых вентилей 150 Гц, моталки – 834 А (450 Гц). Каждый АВ электроприводов клеток 2, 3, 4 рассчитан на ток в 959,1 А и функционирует с частотой ШИМ в 350 Гц.

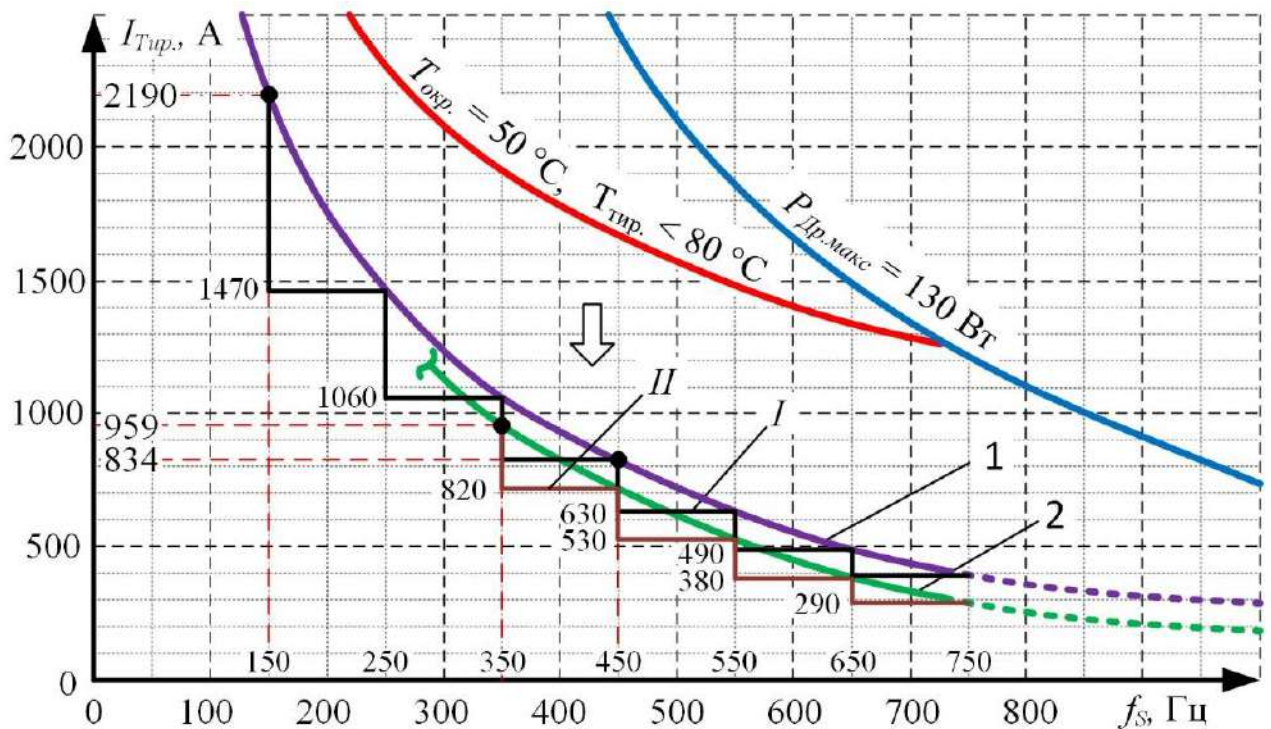


Рисунок 4.3 – Определение граничных значений токов для таблиц усовершенствованной СУ АВ главных электроприводов стана холодной прокатки ЧерМК ПАО «Северсталь»

Полученные значения максимально-допустимых токов АВ при различных частотах коммутации силовых ключей представлены в таблице 4.2.

Следует отметить, что предложенный способ необходим для предварительных расчётов. После внедрения усовершенствованной СУ АВ на действующем оборудовании граничные значения токов для каждой таблицы

Таблица 4.2 – Результаты определения граничных значений токов для таблиц усовершенствованной СУ АВ электроприводов стана холодной прокатки ЧерМК ПАО «Северсталь»

Параметр	АВ ЭП клетки 1/моталки	АВ ЭП клетей 2, 3, 4
Номинальное значение тока, А	2190 (150 Гц) / 834 (450 Гц)	959,1 (350 Гц)
Максимальная величина тока при частоте коммутации 250 Гц, А	1470	—
Максимальная величина тока при частоте коммутации 350 Гц, А	1060	959,1
Максимальная величина тока при частоте коммутации 450 Гц, А	834	820
Максимальная величина тока при частоте коммутации 550 Гц, А	630	530
Максимальная величина тока при частоте коммутации 650 Гц, А	490	380
Максимальная величина тока при частоте коммутации 750 Гц, А	390	290

должны быть уточнены путём слежения за температурными режимами преобразователя при различных режимах работы электропривода.

Полученные величины граничных токов задаются в блоке выбора таблицы усовершенствованной ШИМ.

#### **4.2. Анализ критериев выбора оптимальной таблицы углов переключения для усовершенствованной СУ в зависимости от режима работы электроприводов клеток прокатных станов**

Как уже было отмечено ранее, в предлагаемой усовершенствованной СУ АВ формирование номера требуемой таблицы углов переключения  $n'$ , осуществляет новый блок выбора. Рассмотрим принцип его работы подробнее.

Данный блок должен осуществлять выбор оптимального набора углов переключения силовых ключей с учётом обеспечения стабильной работы ПЧ-АВ. На основании этого можно выделить следующие ключевые условия его функционирования:

1) Используемая таблица углов переключения должна обеспечивать наилучшую ЭМС ПЧ-АВ с питающей сетью для текущего режима работы электропривода;

2) Каждый набор значений углов переключения должен иметь решения в достаточном диапазоне коэффициента модуляции с учётом применения в конкретном режиме работы электропривода;

3) Граничные значения токов для таблиц с различной частотой коммутации силовых ключей должны учитываться блоком выбора с целью недопущения перегрева преобразователя;

4) Смена таблиц не должна производиться с такой частотой, чтобы происходили автоколебательные процессы регулируемых координат АВ, что вызывало бы нарушение нормального функционирования ПЧ-АВ.

Увеличение частоты коммутации силовых ключей АВ при использовании ШИМ с УВГ или ПВГ позволяет удалять/подавлять большее число гармоник, что положительно сказывается на качестве напряжения распределительной сети предприятия. Усовершенствованная СУ АВ способна применять таблицы углов переключения с повышенной частотой коммутации IGCT-тиристорov при работе электроприводов прокатных станов со сниженной нагрузкой. С учётом ранее определённых максимально-допустимых значений токов тиристорov для различной частоты коммутации возможно обеспечение условия сохранения теплового баланса, а значит и устойчивой работы ПЧ.

На рисунке 4.4 показаны области применения наборов углов переключения с различной частотой коммутации силовых ключей для АВ электропривода черновой клетки 2 стана горячей прокатки ЗАО «ММК Metalurji» за цикл его работы. Учитывая, что ПЧ данного электропривода включает в себя два АВ, а на рисунке 4.4 представлен суммарный ток двух АВ  $i_{AB\Sigma.R2}$  за цикл работы прокатного стана, граничные значения токов для каждой таблицы  $I_{Гр}$  были также умножены на два.

В отмеченной на указанном рисунке области существует вероятность частой смены одной таблицы на другую из-за колебаний нагрузки. Данный режим





Рисунок 4.4 – Применение таблиц углов переключения силовых ключей АВ с различной частотой коммутации в зависимости от режима работы электропривода черновой клетки 2 стана горячей прокатки ЗАО «ММК Metalurji»

является нежелательным. Для его исключения в блоке выбора должен применяться элемент гистерезиса со следующим принципом работы: переход на набор углов переключения с меньшей частотой коммутации должен происходить без задержек в связи с учётом тепловых ограничений, обратный переход необходимо осуществлять только после прохождения зоны гистерезиса. Её величина  $I_{Г}$  зависит от параметров электропривода, стана и режимов прокатки. На рисунке 4.5 показана работа блока выбора с гистерезисом для рассматриваемой области работы электропривода черновой клетки 2 стана холодной прокатки. Для данного случая достаточным будет значение  $I_{Г} = 20$  А.

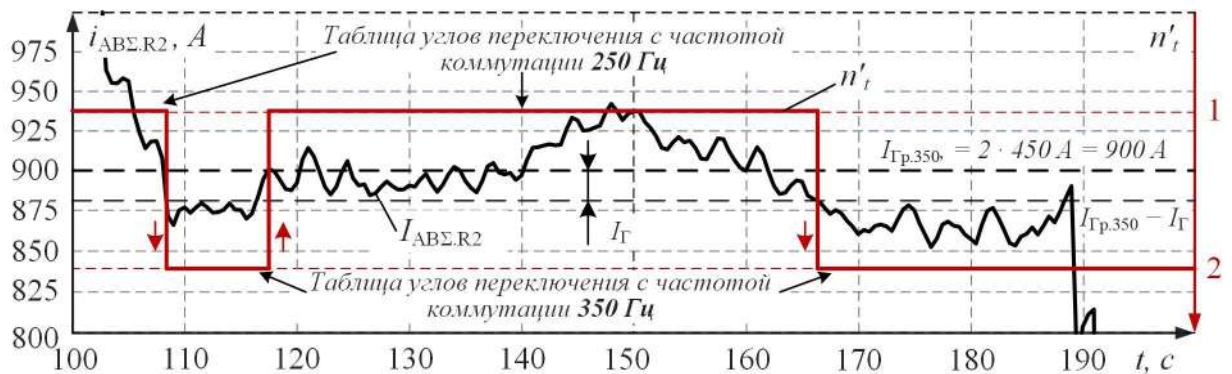


Рисунок 4.5 – Применение гистерезиса в блоке выбора таблиц углов переключения усовершенствованной СУ АВ

На рисунке 4.6 отображены области применения наборов углов переключения с различной частотой коммутации силовых ключей в зависимости от тока АВ электропривода клетки 1 стана холодной прокатки за цикл его работы.



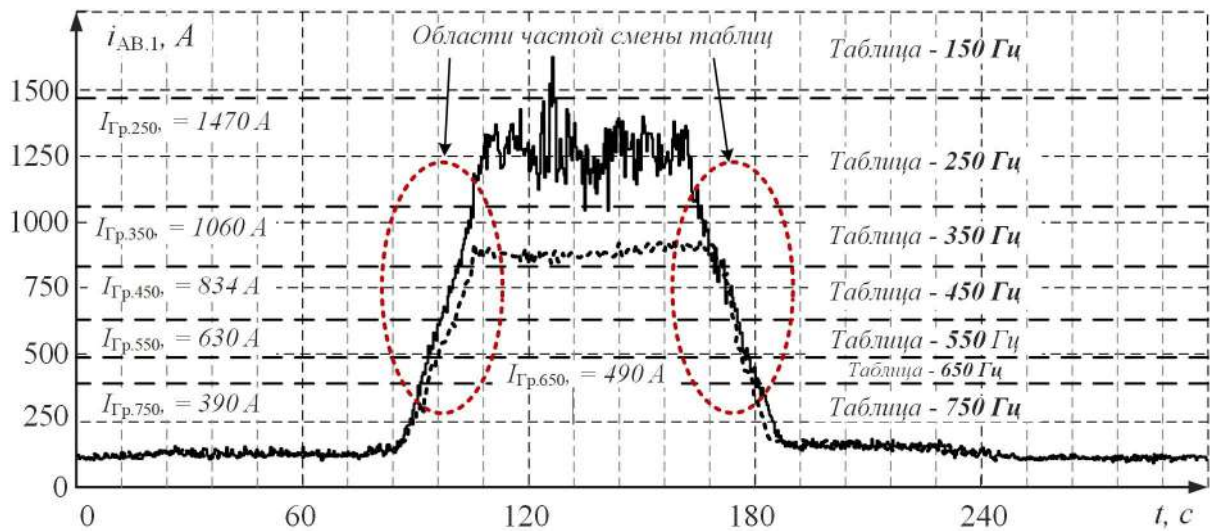


Рисунок 4.6 – Применение таблиц углов переключения силовых ключей АВ с различной частотой коммутации в зависимости от режима работы электропривода клетки 1 стана холодной прокатки ЧерМК ПАО «Северсталь»

Как уже отмечалось ранее, из-за технологических особенностей производства холодного проката для указанного АВ характерно плавное нарастание и спадание тока при разгоне и торможении стана соответственно. За относительно небольшой промежуток времени (12-15 секунд) в масштабе времени цикла работы стана происходит 5 переходов. Положительный технический эффект от применения большого количества таблиц за небольшой промежуток времени может быть несущественным. Кроме того, переход с одного набора углов переключения на другой в некоторых случаях оказывает небольшое возмущающее воздействие на величину потребляемого тока АВ. Поэтому в рассматриваемом случае возможно использование только одной таблицы углов переключения с частотой коммутации 350 Гц. Однако, также стоит учитывать, что при разных профилях прокатки и сортаменте листа нагрузки на электропривод клетки могут отличаться, в результате чего могут потребоваться и другие наборы углов переключения, что видно из рисунка 4.6 (пунктирная линия).

Расчёт значений углов переключения силовых ключей АВ по методам ШИМ с УВГ или ПВГ обычно стараются получить для максимально-возможного диапазона изменения коэффициента модуляции  $m$ . С учётом определённых ранее критериев физической реализуемости данный диапазон может быть существенно

сокращён. В связи с этим возникает задача определения величины возможного изменения коэффициента модуляции в каждом режиме работы электропривода.

На рисунке 4.7 показано изменение коэффициента  $m$  системой управления АВ при различных нагрузках на электропривод за цикл прокатки. Данные величины были получены на представленных ранее имитационных моделях электроприводов на базе ПЧ-АВ стана холодной прокатки ЧерМК. Электропривод клетки 1 был выбран, как работающий в самом тяжёлом режиме. Более типовая схема и величины нагрузок для исследуемых объектов характерны для электропривода клетки 2. Проанализировав полученные результаты, можно сделать вывод, что таблицы углов переключения, рассчитанные в диапазоне изменения коэффициента модуляции от 1,03 до 1,13 будут достаточными для работы СУ АВ во всех режимах электропривода.

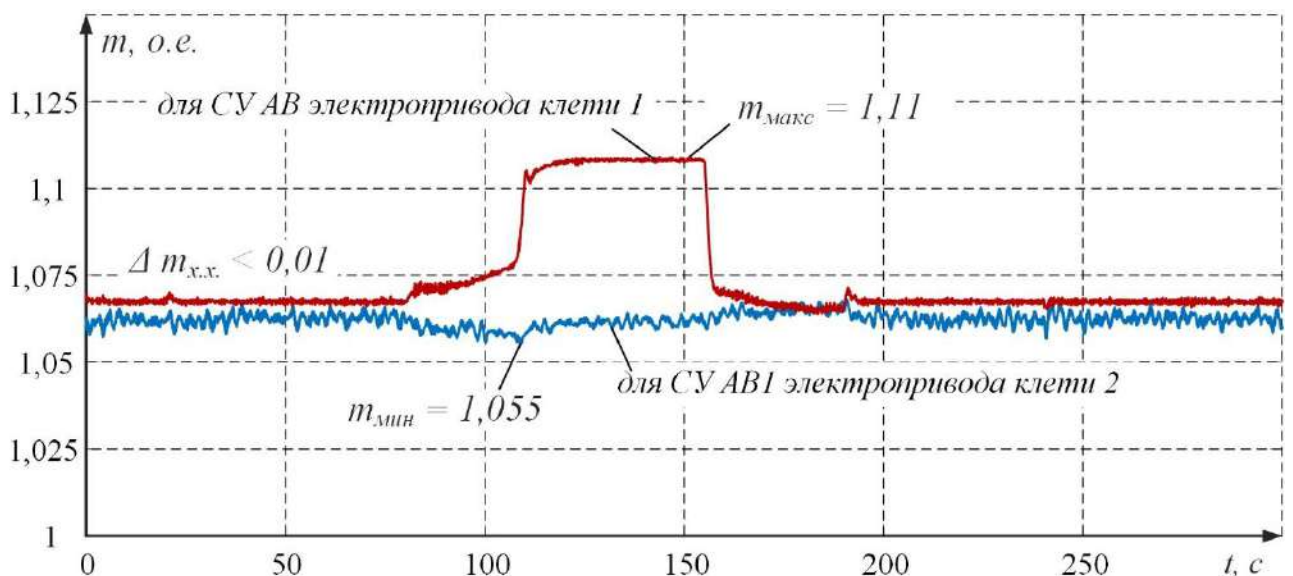


Рисунок 4.7 – Изменение величин коэффициента модуляции СУ АВ электроприводов клеток 1 и 2 за цикл работы стана холодной прокатки

Кроме этого, наборы углов переключения для конкретных режимов работы АВ могут быть определены для ещё более узкого диапазона  $\Delta m$ . Средняя величина коэффициента модуляции при работе АВ клетки 1 без нагрузки составляет  $m_{x.x.cp.1} = 1,067$  при колебаниях не превышающих  $\Delta m_{x.x} < 0,03$ ; аналогичные величины для клетки 2 составляют:  $m_{x.x.cp.2} = 1,063$  при  $\Delta m_{x.x} < 0,1$ .

Однако, следует учитывать, что смена наборов углов переключения в усовершенствованной СУ АВ происходит с задержкой. Поэтому для недопущения режимов, когда система регулирования формирует значение коэффициента  $m$  не определенное текущей таблицей, необходимо рассчитывать наборы углов переключения с запасом, составляющим как минимум 50% в каждую сторону от величины  $\Delta m$  для текущего режима работы.

Для проверки результатов имитационного моделирования были использованы величины коэффициентов модуляции АВ, исследованных в главе 2 электроприводов на базе ПЧ ACS6000, таблица 4.3.

Таблица 4.3 – Величины коэффициентов модуляции, полученные из файлов параметризации ПЧ ACS6000

АВ электропривода		Величина коэффициента модуляции $m$ , о.е.
Стан горячей прокатки 1750 ЗАО «ММК Metalurji»	Черновая клеть 1	1,0674012
	Черновая клеть 2	1,0826795
	Чистовая клеть 1	1,0830905
	Чистовая клеть 2	1,0759974
	Чистовая клеть 3	1,0767796
	Чистовая клеть 4	1,0707655
Стан холодной прокатки ЧерМК ПАО «Северсталь»	Клеть 1	1,0309734
	Клеть 2	1,0193293
	Клеть 3	1,0259931
	Клеть 4	1,0261559
	Моталка	1,0164716

Результаты имитационного моделирования показывают высокую сходимость величин коэффициента модуляции АВ с экспериментальными данными, что позволяет их использовать для дальнейших расчётов и исследований.

### 4.3. Расчёт таблиц углов для усовершенствованной СУ АВ с алгоритмом ШИМ с УВГ

Применение ШИМ с УВГ может быть целесообразным для усовершенствованной СУ АВ главных электроприводов стана холодной прокатки ЧерМК ПАО «Северсталь». Для точки общего присоединения заводской ГПП характерно наличие основного резонанса в относительно небольшом диапазоне частот  $f_{PE3} = 1450-2100$  Гц. Удаление высших гармонических составляющих тока АВ, попадающих в данную область, позволит значительно улучшить ЭМС ПЧ-АВ с питающей сетью. Кроме этого, также стоит удалить значимые гармоники, присутствующие в гармоническом спектре напряжения точки общего присоединения – секций ЗРУ-10 кВ ГПП-2.

Как показали экспериментальные исследования, представленные в главе 2, в контроллере АВ электропривода клетки 1 применён ШИМ с УВГ с 3-мя переключениями за четверть периода и удалением 5 и 7 гармоник. В усовершенствованной СУ следует применить дополнительные таблицы с 5, 7 и 13-15 переключениями. Аналогичный алгоритм ШИМ применён в АВ ЭП клетей 2-4 с 7 переключениями за четверть периода. Дополнительные наборы углов переключения должны иметь 9 и 13-15 переключений.

Активный выпрямитель электропривода моталки имеет самую высокую частоту коммутации силовых ключей – 450 Гц или 9 переключений за 1/4 периода. Соответственно в этом случае дополнительные таблицы необходимо рассчитать для 11 и 13-15 переключений. Максимальная частота коммутации может быть ограничена из-за условия физической реализуемости - минимально-допустимой длительности команд на включенное и отключенное состояние IGBT-тиристора.

Расчёт значений углов переключения силовых ключей производится согласно описанным в главе 1 положениям. Для вычислений использовалось разработанное программное обеспечение [135], реализованное в среде Matlab. Помимо удовлетворения указанным ранее критериям, необходимо, чтобы полученные результаты расчётов обеспечивали минимальное значение

коэффициента  $K_U$  для формируемого напряжения на входе АВ. Введение указанного условия позволяет найти оптимальную таблицу ещё на этапе вычислений.

На рисунке 4.8 представлены два полученных варианта значений углов коммутации тиристоров при ШИМ с УВГ с 3-мя переключениями и удалением 5 и 7 гармоник. Оба набора обеспечивают схожие показатели в отношении величины  $K_U$ , однако второй определён для большего диапазона изменения коэффициента модуляции  $m$ . Поэтому в дальнейшем будем использовать именно его. Результаты расчётов в числовом виде также представлены в приложении Г.

При расчётах учитывались описанные ранее критерии реализуемости таблиц. На рисунке 4.8 а) показана область значения угла  $a_3$ , где нарушено предъявляемое требование  $\Delta a_{min} = 0,72^\circ$ . На дальнейших рисунках будут отображены только те значения углов, которые удовлетворяют данному критерию.

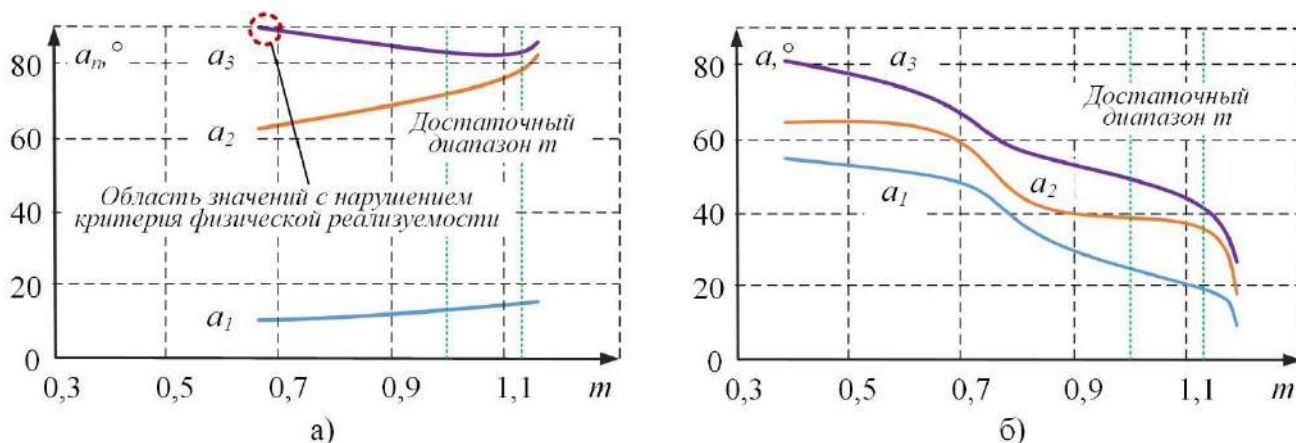


Рисунок 4.8 – Возможные наборы значений углов переключений ШИМ с УВГ при удалении 5-ой и 7-ой гармоник

При работе электропривода клетки 1 со сниженной нагрузкой усовершенствованная СУ АВ может применять таблицу с частотой коммутации тиристоров 250 Гц (5 переключений за 1/4 периода). На рисунке 4.9 показаны два полученных варианта решений; второй обладает лучшими показателями, поэтому будем применять его. Также возможно использование таблицы с 7 переключениями за 1/4 периода. При расчётах было получено 4 возможных начальных значения, однако только два из них относительно обеспечивают наличие решений в необходимом диапазоне, рисунок 4.10.

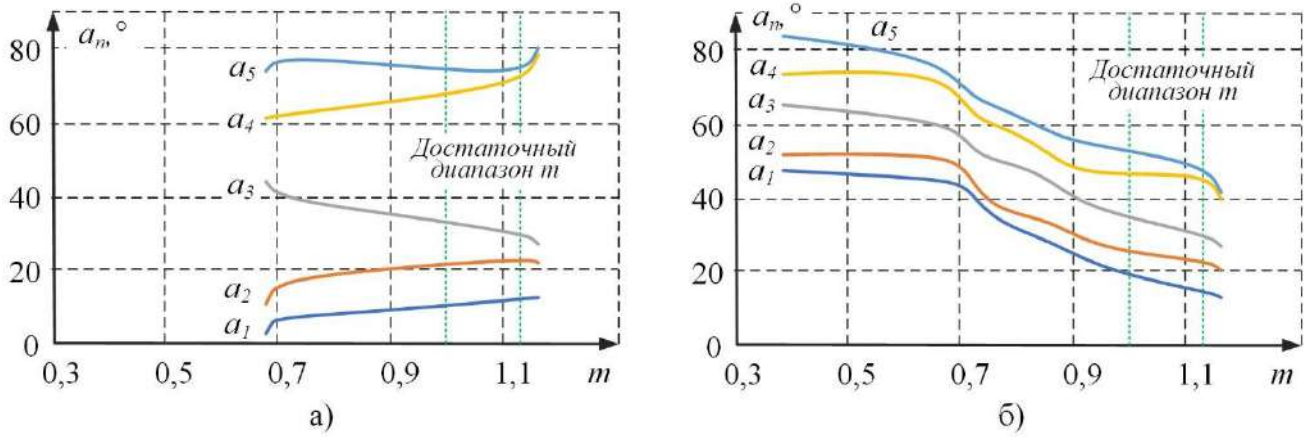


Рисунок 4.9 – Возможные наборы значений углов переключений ШИМ с УВГ при удалении 5, 7, 11, 13 гармоник

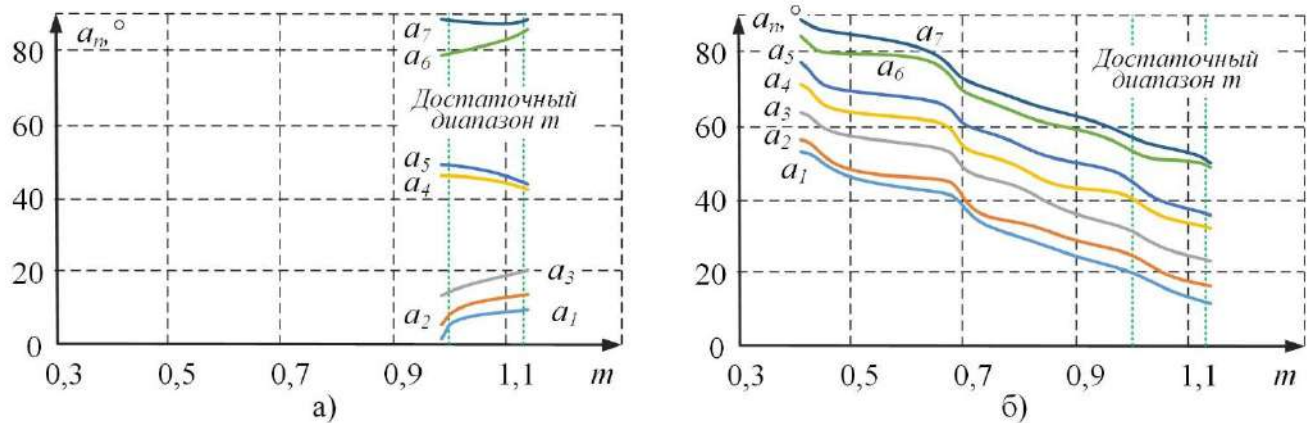


Рисунок 4.10 – Возможные наборы значений углов переключений ШИМ с УВГ при удалении 5, 7, 11, 13, 17, 19 гармоник

Расчёт таблиц с увеличенной частотой коммутации связан со значительным усложнением уравнения (1.6), в результате чего существенно увеличивается время поиска решений на ЭВМ методом перебора всех начальных значений.

Для номинального режима работы моталки применяется таблица углов коммутации силовых ключей с 9 переключениями за  $1/4$  периода. На рисунке 4.11 а) представлены рассчитанные значения самого подходящего варианта решения из 4 полученных. При работе моталки со сниженной нагрузкой или на холостом ходу могут применяться таблицы с частотой коммутации вентилей 550 и 650 Гц, рисунок 4.11 б,в). Также полученные наборы углов переключений могут быть применены в СУ АВ ЭП клетки 1 при работе на холостом ходу.



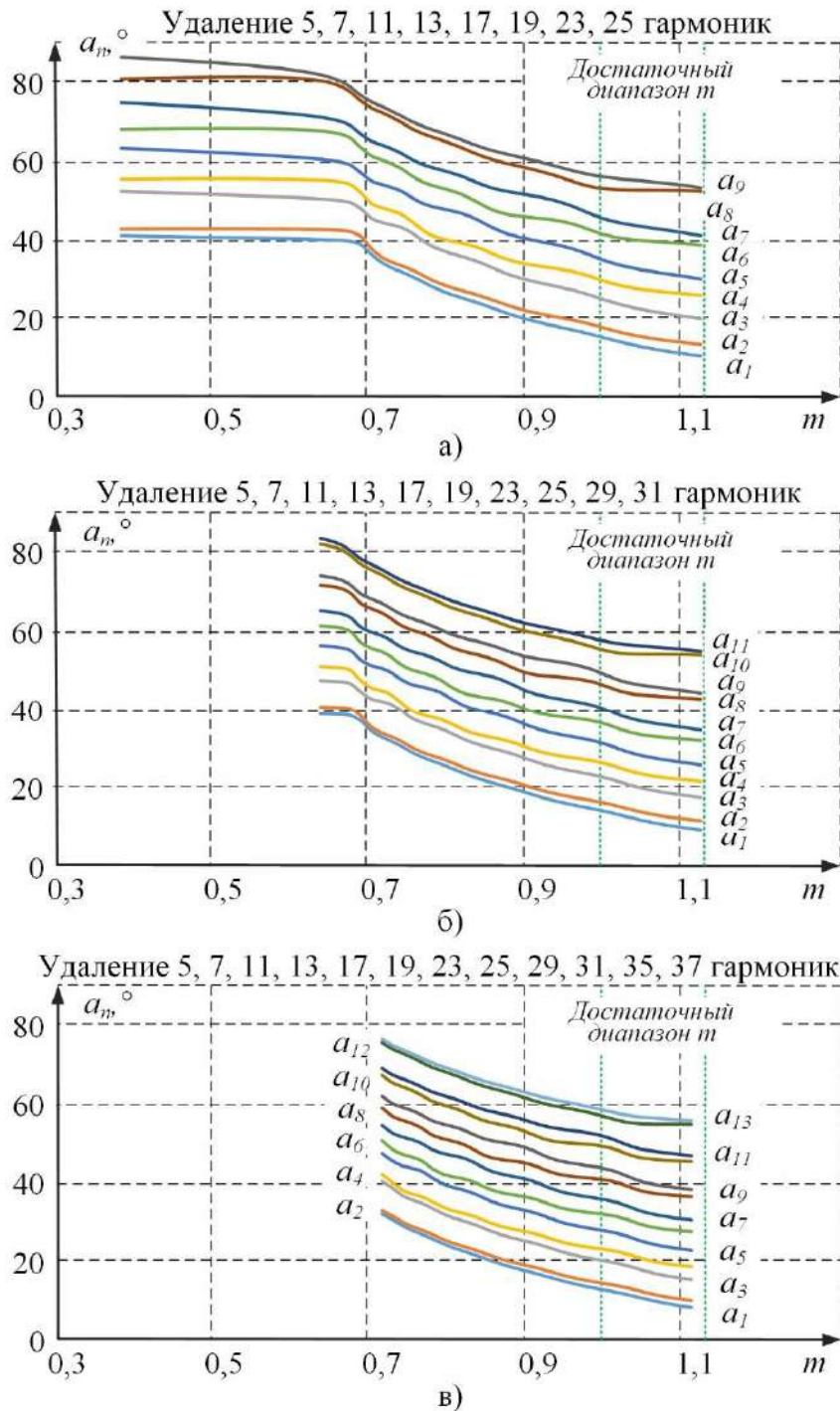


Рисунок 4.11 – Рассчитанные наборы значений углов переключений по методу ШИМ с УВГ для усовершенствованной СУ АВ электропривода моталки при а) 9, б) 11, в) 13 переключениях силовых ключей за  $1/4$  периода

Из рисунка 4.11 в) видно, что диапазон возможных решений углов переключений относительно коэффициента модуляции с увеличением частоты коммутации IGBT-тиристорov сильно сократился. Это связано с двумя причинами: 1) увеличение сложности задаваемой системы уравнений, а значит сокращение

вариантов возможных решений; 2) большее число переключений приводит к уменьшению величины  $\Delta a$ , в результате чего сокращается диапазон решений, соответствующих критерию  $\Delta a_{min} = 0,72^\circ$ . По этой причине не удалось отыскать удовлетворительного решения при частоте коммутации силовых вентилях 750 Гц.

Аналогичным образом были рассчитаны таблицы для усовершенствованной СУ АВ электроприводов клеток 2-4, рисунок 4.11. Для номинальной частоты коммутации полупроводниковых вентилях удалось получить таблицу в широком диапазоне изменения коэффициента модуляции, рисунок 4.11 а). Наилучший вариант набора углов коммутации с 9 переключениями за 1/4 периода и удалением 5, 7, 11, 23, 25, 35 и 37 гармоник имеет решения в недостаточно широкой области, рисунок 4.11 б). Поэтому расчёт был произведён для иных начальных условий,

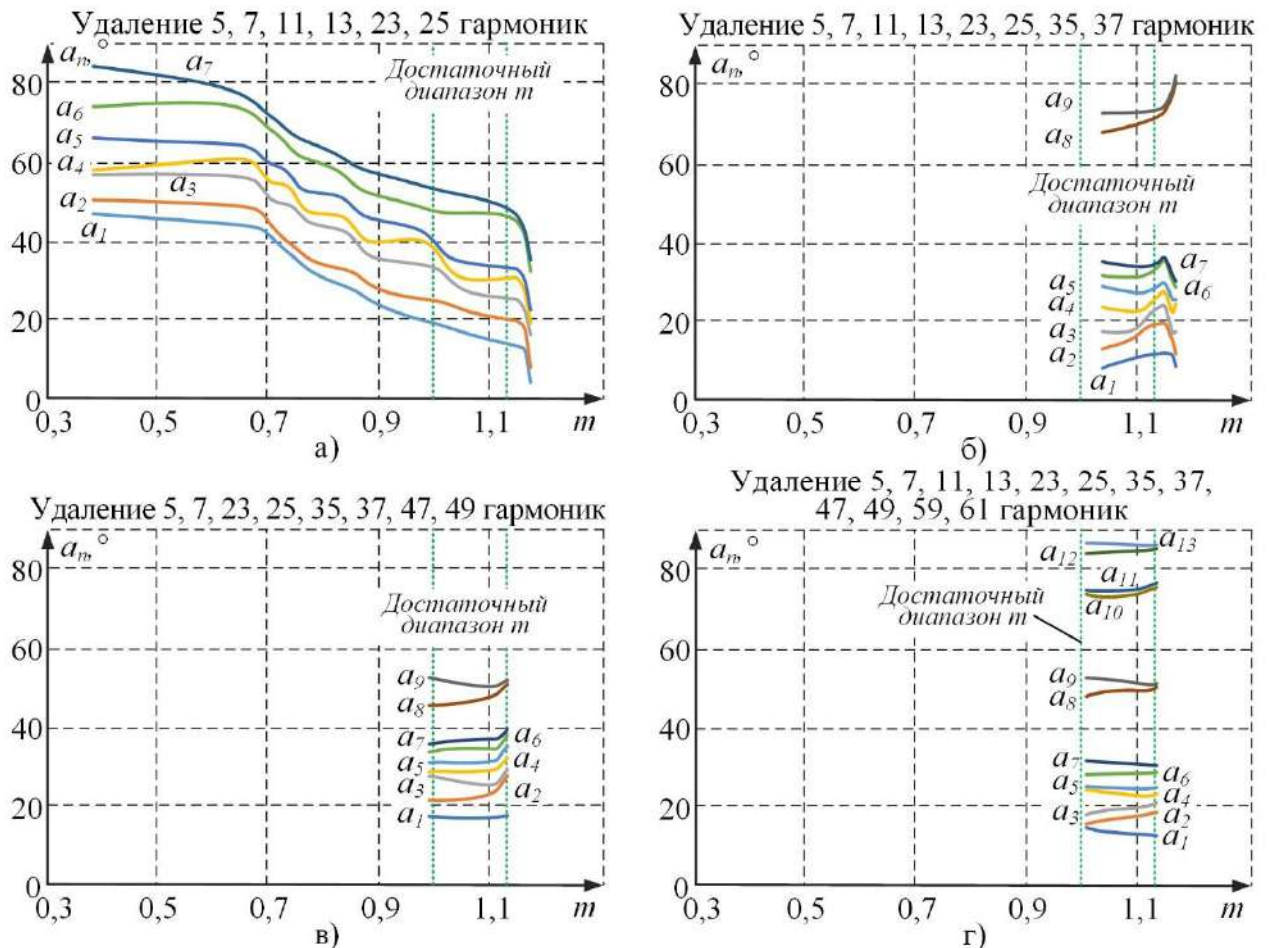


Рисунок 4.12 – Рассчитанные наборы значений углов переключений по методу ШИМ с УВГ для усовершенствованной СУ АВ электроприводов с 12-пульсной схемой питания при а) 7, б, в) 9, г) 13 переключениях силовых ключей за 1/4 периода

рисунок 4.11 в). Можно отметить, что полученные наборы углов переключения хоть и удовлетворяют предъявляемым критериям, имеют решения в относительно небольшом диапазоне.

Применение таблиц с высокой частотой коммутации силовых ключей позволяет исключить все значимые гармоники, присутствующие в гармоническом спектре напряжений точки общего присоединения, а также гармоники, попадающие в основную резонансную область частотной характеристики сети.

#### **4.4. Расчёт таблиц углов для усовершенствованной СУ АВ с алгоритмом ШИМ с ПВГ**

Применение ШИМ с УВГ в АВ мощных ПЧ позволяет получить значительный положительный технический эффект только для систем электроснабжения предприятий с резонансными явлениями в относительно небольшой области частотной характеристики сети.

В случае электротехнического комплекса ЗАО «ММК Metalurji» с широкой резонансной областью, как будет показано позднее, большую эффективности имеет алгоритм ШИМ с ПВГ.

Все АВ ЭП клетей стана горячей прокатки имеют исходную частоту коммутации IGCT-тиристоров равную 250 Гц. Для усовершенствованной СУ АВ черновых клетей возможно применение дополнительных наборов углов переключений с частотами 350 и 450 Гц, для чистовых – с максимальной частотой 650 Гц.

Также стоит отметить, что при расчётах для корректной работы блока ФАПЧ производилось практически полное устранение 5 и 7 гармоник. Гармоники с номерами от 35 до 109, попадающие в зону экстремума импеданса  $Z(f)$  подавлялись до минимально возможных величин. Из всех полученных начальных значений углов для  $m = 1,07$  отбирался вариант с минимальным значением  $K_U$  напряжения, формируемого на входе АВ, с учётом только характерных для 12-пульсной схемы питания гармоник.

На рисунке 4.13 представлены результаты расчётов. Увеличение частоты коммутации силовых ключей позволяет получить таблицы углов переключения, обеспечивающие более низкую величину коэффициента  $K_U$  для напряжения на входе преобразователя. В тоже время значительно сокращается область решений. Так наборы углов переключения, рассчитанные для частоты коммутации 450 Гц – рисунок 4.13 в,г), не имеют значений в достаточном диапазоне изменения коэффициента модуляции для отработки всех режимов работы электропривода. Поэтому их применение допустимо только при функционировании АВ без нагрузки.

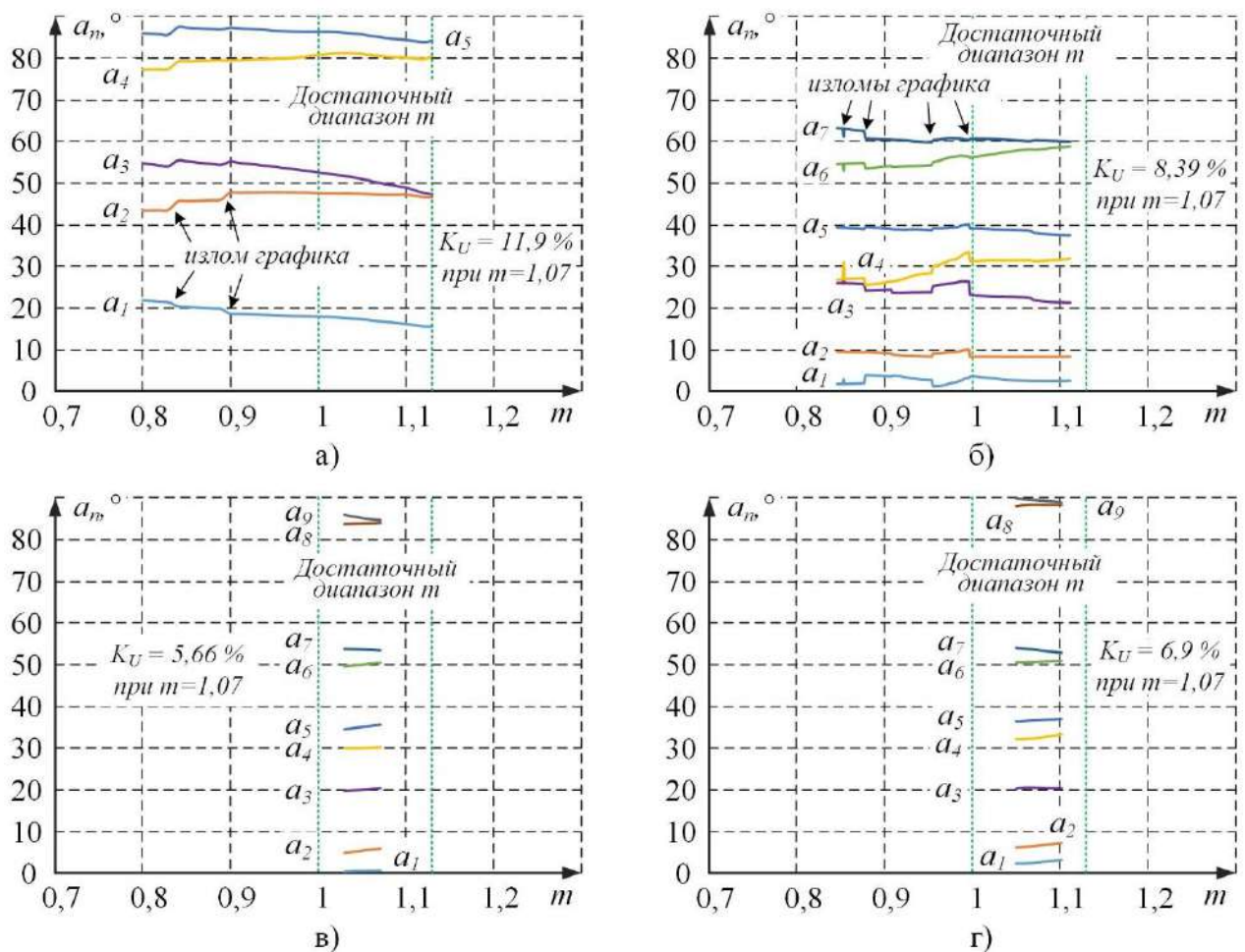


Рисунок 4.13 – Рассчитанные наборы значений углов переключений по методу ШИМ с ПВГ для усовершенствованной СУ АВ электроприводов с 12-пульсной схемой питания при а) 5, б) 7, в, г) 9 переключениях силовых ключей за 1/4 периода

В тоже время следует отметить, что резкий наброс нагрузки характерный для электроприводов на базе ПЧ-АВ стана горячей прокатки требует применения на холостом ходу АВ таблиц углов переключения, определённых для большей зоны изменения коэффициента модуляции с учётом задержек при переходе на таблицу для основного режима работы. Результаты экспериментального моделирования показали, что рассчитанные таблицы, рисунок 4.13 в,г), удовлетворяют указанному условию и обеспечивают стабильное функционирование АВ.

На рисунках 4.13 а,б) отмечены участки изломов графиков. В этих зонах происходит смена одних начальных комбинаций углов переключения, используемых для решения заданной системы уравнений (1.9) на другие. Это объясняется тем, что величины отдельных гармоник не приравниваются к нулю, как в ШИМ с УВГ, а должны быть меньше ограничения. В результате при прочих равных появляется больше возможных вариантов решений.

Работа СУ АВ при больших значениях  $da/dm$  особенно при реализации многопульсных схем питания ПЧ может быть нестабильной в отношении ПКЭ. Наилучшие результаты обеспечивают решения с линейно меняющимися значениями углов и небольшой величиной  $da/dm$ . Полученные решения, рисунок 4.13, не имеют резких изломов в рабочей области диапазона коэффициента модуляции для исследуемых объектов.

#### **4.5. Выводы по главе 4**

1. Разработана методика расчёта оптимальных таблиц углов переключения силовых ключей для усовершенствованной СУ АВ, включающая следующие этапы: 1) определение критериев физической реализуемости наборов углов для данного преобразователя; 2) определение критериев выбора таблиц углов переключения с различной частотой коммутации для каждого статического и динамического режима работы электропривода; 3) расчёт наборов углов переключения, обеспечивающих наилучшую ЭМС ПЧ с питающей сетью, с учётом предъявляемых критериев.

2. Обоснованы критерии физической реализуемости наборов углов переключения для АВ с IGCT-тиристорами исследованных в главе 2 электроприводов на базе ПЧ ACS6000. Среди них отмечены, минимально-допустимая длительность команд на включенное и отключенное состояние IGCT-тиристора и максимально-допустимая величина тока АВ при различной частоте коммутации силовых ключей для сохранения их оптимального теплового режима.

3. Для АВ главных электроприводов стана горячей прокатки ЗАО «ММК Metalurji» и стана холодной прокатки ЧерМК ПАО «Северсталь» определены условия применения таблиц углов переключения силовых ключей с различной частотой коммутации для статических и динамических режимов работы электропривода с учётом существующих ограничений по нагреву IGCT-тиристорov.

4. На примере исследуемых электроприводов клеток прокатных станов ЗАО «ММК Metalurji» и ЧерМК ПАО «Северсталь» для усовершенствованной СУ АВ определены оптимальные таблицы углов переключения с различной частотой коммутации силовых ключей с учётом критериев физической реализуемости. Данные таблицы будут использованы при имитационном моделировании режимов работы ПЧ-АВ с усовершенствованной СУ АВ для оценки её эффективности с точки зрения улучшения ПКЭ в системах внутризаводского электроснабжения.

5. Разработанная методика является универсальной и может использоваться для настройки усовершенствованной СУ АВ ПЧ-АВ в составе электроприводов клеток станов горячей и холодной прокатки. Также данная методика может быть применена для любых других промышленных электроприводов на базе ПЧ-АВ с циклическим характером изменения нагрузки. Настройки СУ АВ будут зависеть от конкретного агрегата, особенностей его режимов работы, параметров ПЧ-АВ и системы электроснабжения.



## **ГЛАВА 5. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АКТИВНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ С ДИНАМИЧЕСКИМ ВЫБОРОМ ТАБЛИЦ УГЛОВ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ТИРИСТОРОВ**

Настоящая глава посвящена оценке эффективности предложенной усовершенствованной СУ АВ с динамическими таблицами углов переключения силовых ключей. Исследования проводились на имитационных моделях систем электроснабжения и электроприводов с ПЧ-АВ прокатных станов ЗАО «ММК Metalurji» и ЧерМК ПАО «Северсталь», в которые была интегрирована разработанная имитационная модель усовершенствованной СУ АВ.

Оптимальные наборы углов переключения IGCT-тиристорov для каждого электропривода с учётом критериев физической реализуемости, рассчитанные в предыдущей главе, были заданы в предлагаемой СУ АВ в применяемых имитационных моделях.

Оценка эффективности усовершенствованной СУ АВ на имитационной модели позволит определить целесообразность её внедрения на действующих ПЧ-АВ электроприводах прокатных станов.

### **5.1. Анализ эффективности применения усовершенствованной СУ АВ в электроприводах стана горячей прокатки 1750 ЗАО «ММК Metalurji»**

Имитационное моделирование проводилось с учётом токов АВ за цикл работы прокатного стана, представленных на рисунке 2.8 в). Полученные результаты приведены на рисунке 5.1. Применение усовершенствованной СУ АВ с динамическим выбором таблиц углов переключения позволяет снизить среднюю величину  $K_U$  для точки общего присоединения – шин секции D ЗРУ-34,5 кВ ГПП 51EDM металлургического завода ЗАО «ММК Metalurji» – за цикл работы стана горячей прокатки на 59,7 %. При этом важно отметить, что улучшение значения указанного показателя качества электроэнергии происходит для всех режимов

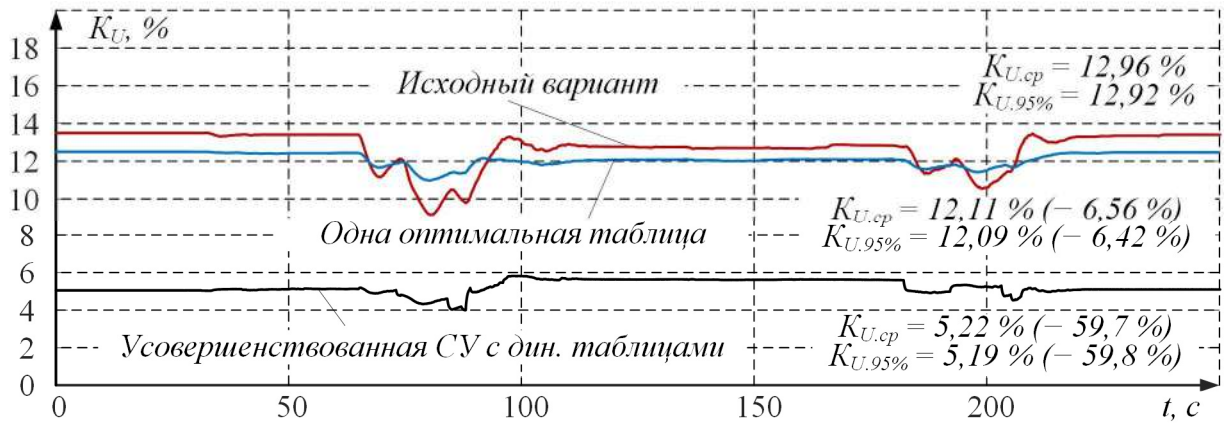


Рисунок 5.1 – График изменения коэффициента  $K_U$  за цикл работы прокатного стана для секции D ЗРУ-34,5 кВ 51EDM ЗАО «ММК Metalurji» работы электроприводов стана по сравнению с исходным вариантом (экспериментальные данные, представленные в главе 2).

Также на рисунке 5.1 показан график изменения величины  $K_U$  при использовании одного набора углов с 5 переключениями за  $1/4$  периода, рассчитанного по методу ШИМ с ПВГ с учётом резонансных явлений в частотной характеристике сети. Данная таблица обеспечивает более высокие показатели ЭМС ПЧ-АВ с питающей сетью, чем исходный вариант, что позволяет достичь уменьшения  $K_U$  примерно на 6,5 %. Однако, указанный положительный технический эффект является незначительным.

Эта же таблица применяется и в усовершенствованной СУ АВ при работе преобразователей с номинальными значениями нагрузки. При прокатке сляба станом некоторые электроприводы клетей работают со сниженными значениями нагрузки. Усовершенствованные СУ АВ этих электроприводов используют таблицы с увеличенной частотой коммутации. В результате чего величина  $K_U$  при использовании усовершенствованной СУ АВ ниже, чем при работе с одним набором углов переключения. Также стоит отметить, что работа ПЧ-АВ электроприводов клетей стана с различными таблицами вызывает эффект активной фильтрации, что приводит к ещё большему снижению  $K_U$ . Суть эффекта заключается в том, что высшие гармоники тока отдельных ПЧ при работе их АВ с разными наборами углов переключения могут иметь различную величину и фазу, отличающуюся на  $180^\circ$ . В результате чего, в суммарном сетевом токе группы ПЧ-

АВ присутствует взаимная компенсация отдельных гармоник, приводящая к снижению величины  $K_U$  и  $K_I$  в точке общего присоединения на общих секциях заводской ГПП.

Помимо исследований эффективности усовершенствованной СУ АВ с таблицами углов переключения, рассчитанными по методу ШИМ с ПВГ, была проанализирована эффективность использования ШИМ с УВГ для рассматриваемого случая. Для каждого режима работы были рассчитаны по 3 варианта наборов углов переключений. Первый вариант предусматривал удалением всех значимых гармонических составляющих подряд. Второй и третий варианты учитывали резонансный процесс и отличались только номерами удаляемых гармоник. На рисунке 5.2 представлен график изменения  $K_U$  при использовании наилучшей комбинации таблиц ШИМ с УВГ. Положительный технический эффект минимален и значительно уступает варианту усовершенствованной СУ АВ с таблицами ШИМ с УВГ.

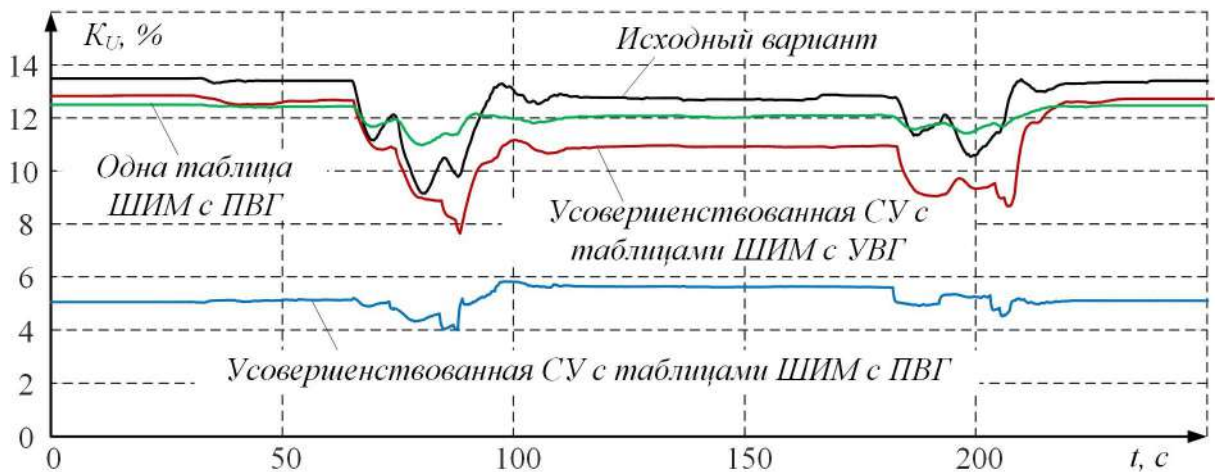


Рисунок 5.2 – График изменения коэффициента  $K_U$  за цикл работы прокатного стана при использовании различных алгоритмов ШИМ и СУ АВ

Как уже было отмечено ранее, количество гармоник подлежащих удалению при ШИМ с УВГ ограничено частотой коммутации силовых ключей. При этом происходит значительное усиление соседних гармоник, оставшихся в гармоническом спектре. Из-за значительной ширины области резонанса частотной характеристики сети относительно секции D 51EDM при применении ШИМ с УВГ не удаётся исключить все необходимые гармоники. Поэтому в данном случае

большую эффективность показывает метод ШИМ с ПВГ, позволяющий снизить величину большего числа высших гармонических составляющих.

На рисунке 5.3 отмечены три выбранных интервала времени для проведения подробного исследования показателей качества электроэнергии на шинах секции D 51EDM при использовании усовершенствованной СУ АВ электроприводов стана горячей прокатки.

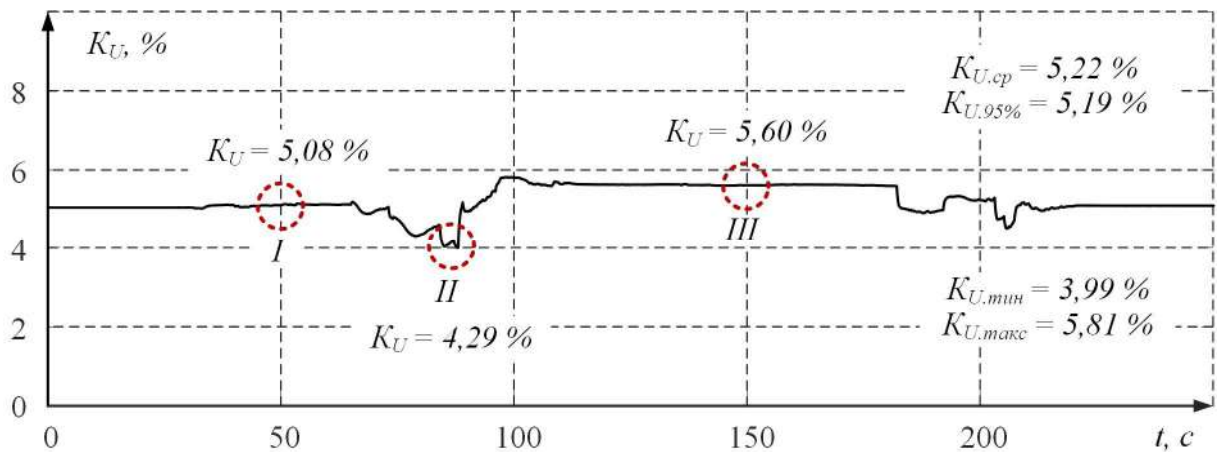


Рисунок 5.3 – Выбранные интервалы времени для проведения детального анализа ПКЭ при использовании усовершенствованной СУ АВ

На интервале I все АВ электроприводов работают при низкой нагрузке и с применением СУ таблиц углов переключения с частотой коммутации силовых ключей 450 Гц. На рисунке 5.4 приведены мгновенные значения напряжений и потребляемые токи шин секции D, гармонический состав напряжения и тока фазы А, полученные при имитационном моделировании. Значение  $K_U$  для фазы А составило 5,08 %, что превосходит действующий норматив в 4 % [95]. Также величины гармоник 23 и 49 выше значений ограничения, установленных стандартом [95]. Благодаря использованию ШИМ с ПВГ удалось значительно снизить величины высших составляющих тока, попадающих в зону экстремума резонанса. В результате чего гармоники напряжения на данной частоте не превышают установленные лимиты.

На рисунке 5.5 рассмотрен интервал II. В этот момент времени происходит заход сляба в клетки стана. Часть электроприводов работают с максимальной нагрузкой, часть – без нагрузки на холостом ходу. Для указанного интервала

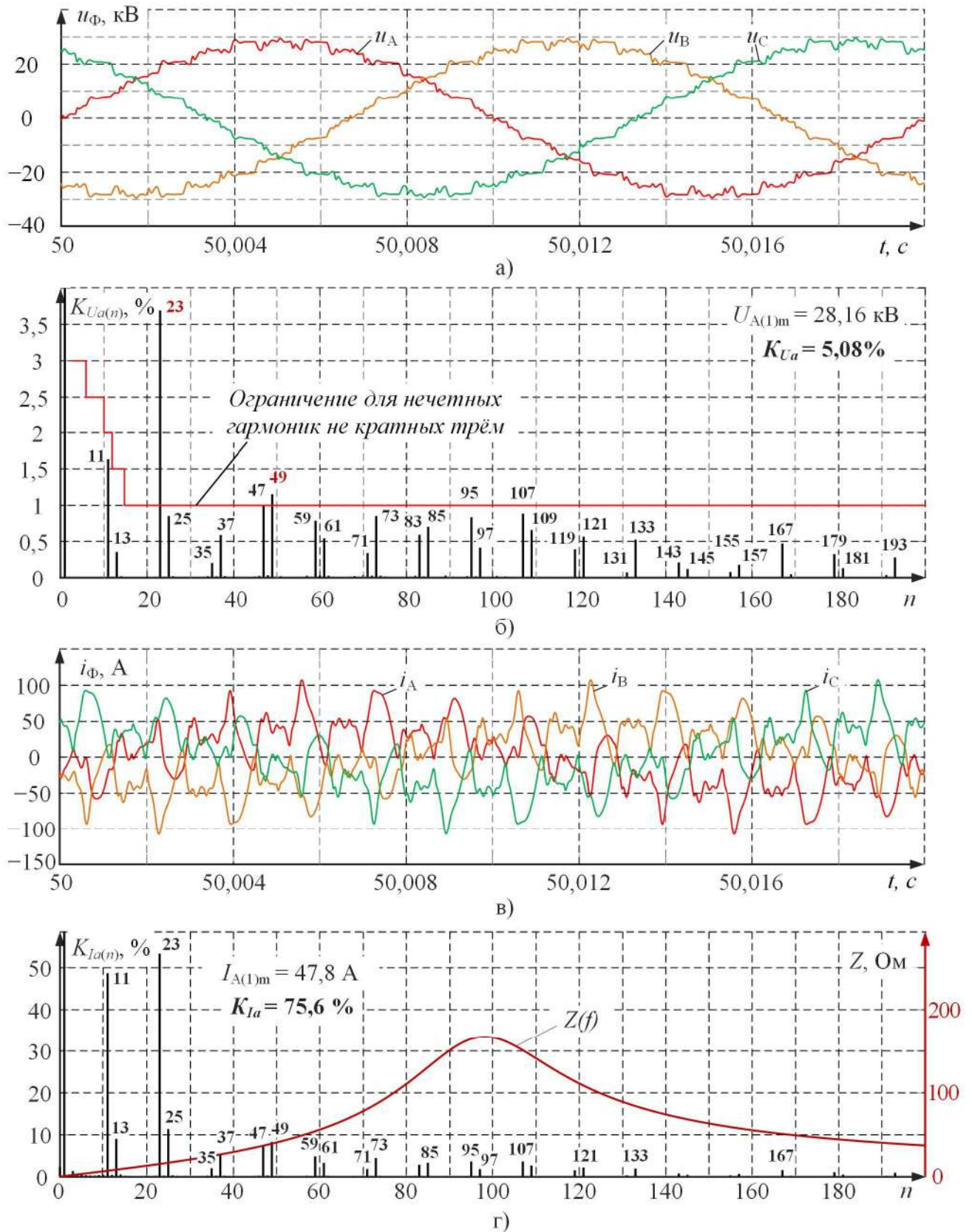


Рисунок 5.4 – Анализ показателей качества электроэнергии для точки общего присоединения внутривоздушных потребителей ЗАО «ММК Metalurji» при использовании усовершенствованной СУ АВ для исследуемого интервала I



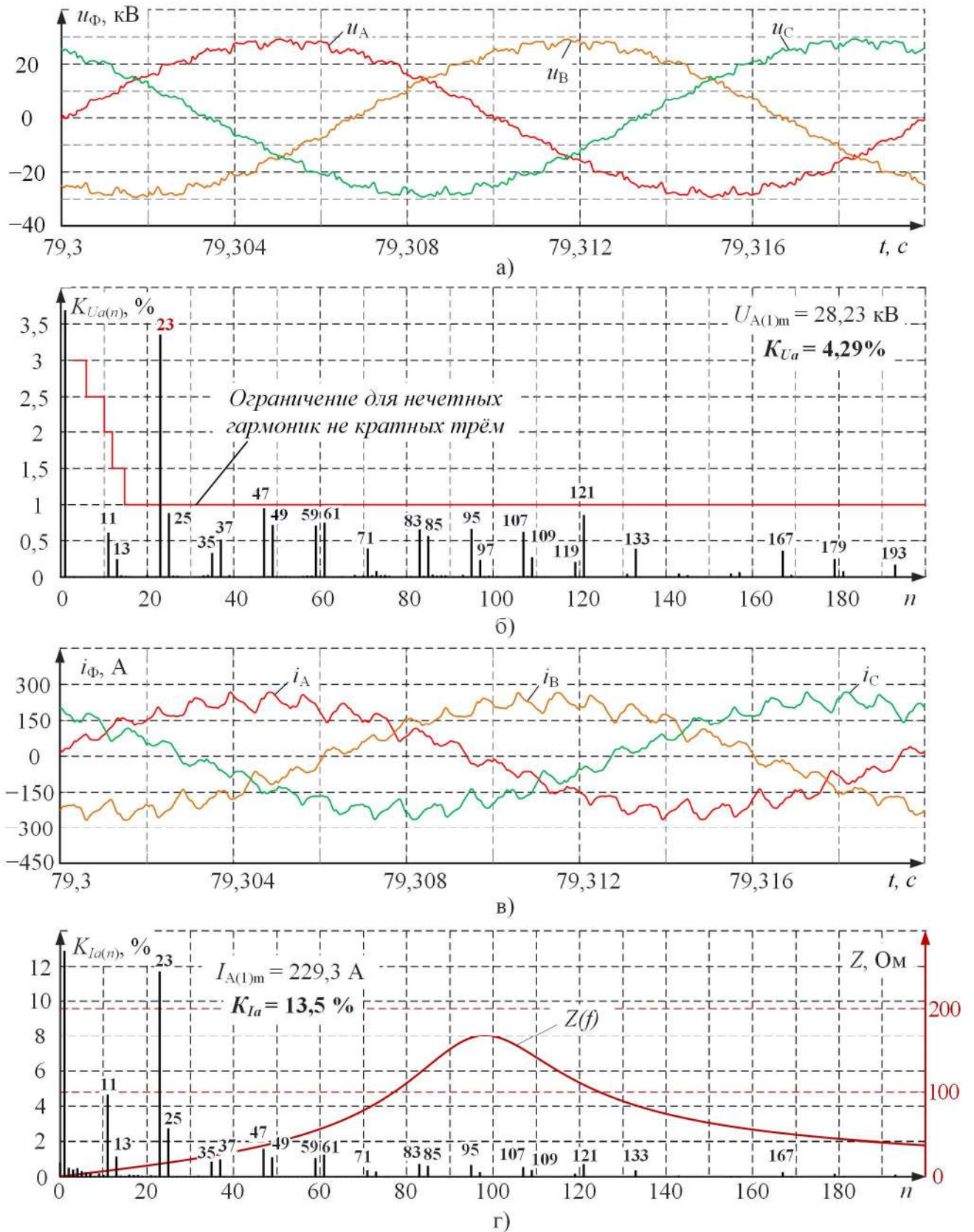


Рисунок 5.5 – Анализ показателей качества электроэнергии для точки общего присоединения внутризаводских потребителей ЗАО «ММК Metalurji» при использовании усовершенствованной СУ АВ для исследуемого интервала II



наблюдается одно из самых низких значений  $K_U = 4,29$  % за цикл работы прокатного стана. В гармоническом спектре напряжения только 23 гармоника превышает установленные ограничения.

На рисунке 5.6 показан исследуемый интервал времени III для режима работы, когда все электропривода стана работают под нагрузкой. Из-за использования усовершенствованной СУ АВ таблиц углов переключения с более низкой частотой коммутации силовых ключей и соответственно не столь эффективным подавлением гармоник величина  $K_U$  для рассматриваемого участка внутриводской электрической сети выше на 10,2 %, чем при работе электроприводов на холостом ходу. Гармонические составляющие напряжения с номерами 13, 23, 25, 35, 47, 61, 71, 109 превосходят величины ограничений.

На рисунках 5.7 и 5.8 проведён сравнительный анализ показателей качества электроэнергии секции D ЗРУ-34,5 кВ ГПП 51EDM ЗАО «ММК Metalurji», полученных при экспериментальных исследованиях и имитационном моделировании с усовершенствованной СУ АВ для двух основных режимов работы стана. При проведении моделирования нагрузки электроприводов задавались таким образом, чтобы получить в результате величины тока фазы А секции D эквивалентные экспериментальным данным. Стоит напомнить, что из-за некорректной настройки АВ главных электроприводов стана потребляемые ими токи несимметричны, что видно из рисунков, представленных в главе 2. Действующее значение тока фазы А на рисунке 5.7 д) составляло 383 А.

Величина  $K_{Ua}$  при использовании усовершенствованной СУ АВ снизилась на 34,2 % для режима работы под нагрузкой, рисунок 5.7 в,г). Номера значимых гармонических составляющих сместились в более низкочастотную область. При этом значение коэффициента  $K_{Ia}$  увеличилось на 73,7 %. При работе электроприводов стана на холостом ходу усовершенствованная СУ АВ позволяет достичь большего положительного технического эффекта в отношении величины  $K_{Ua}$  – снижение на 61,6 %. В гармоническом спектре напряжения присутствуют только 2 гармоники, превышающие установленные лимиты, против 9 в исходном случае. Также фиксируется снижение величины  $K_{Ia}$  на 31,1 %.

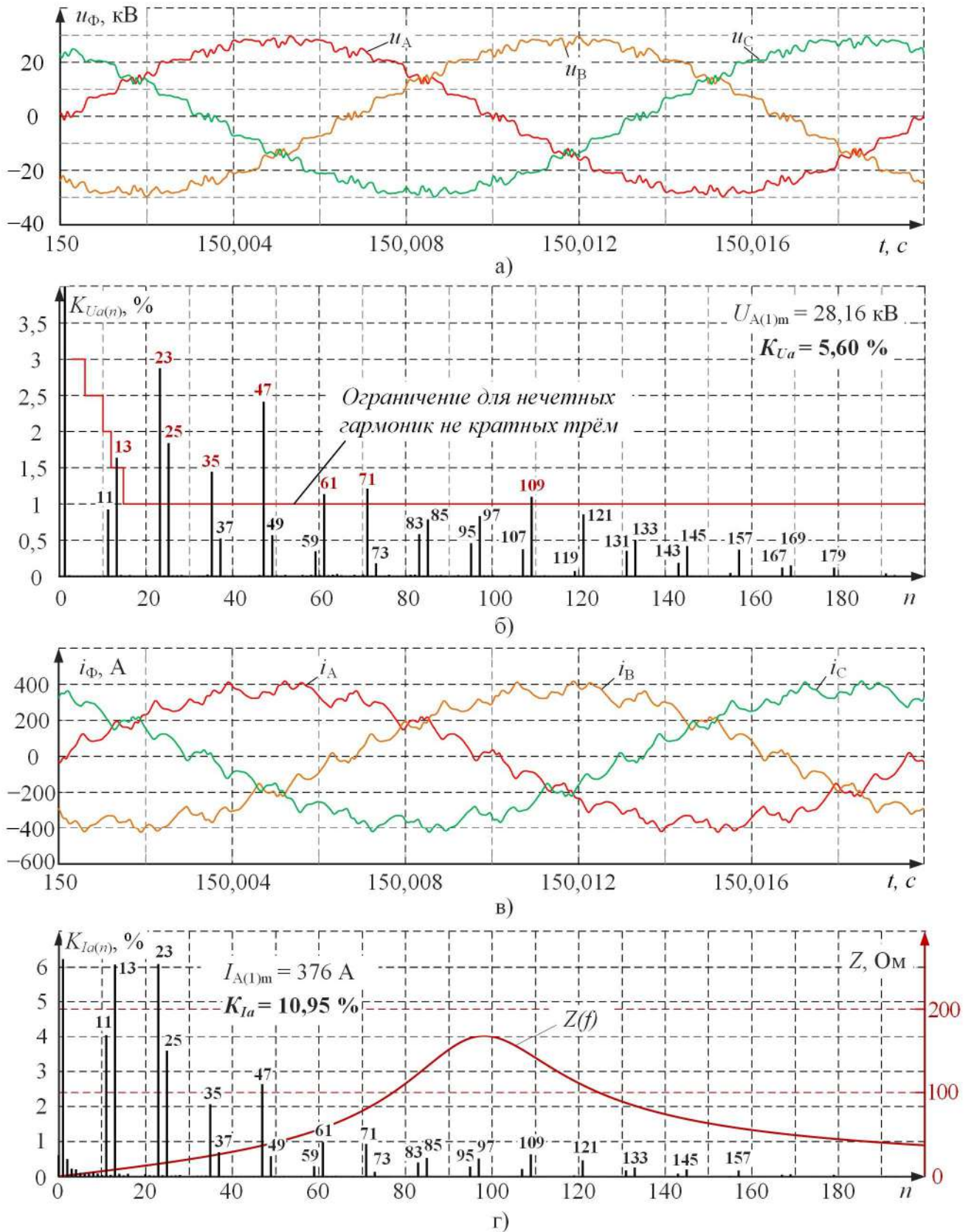


Рисунок 5.6 – Анализ показателей качества электроэнергии для точки общего присоединения внутризаводских потребителей ЗАО «ММК Metalurji» при использовании усовершенствованной СУ АВ для исследуемого интервала III

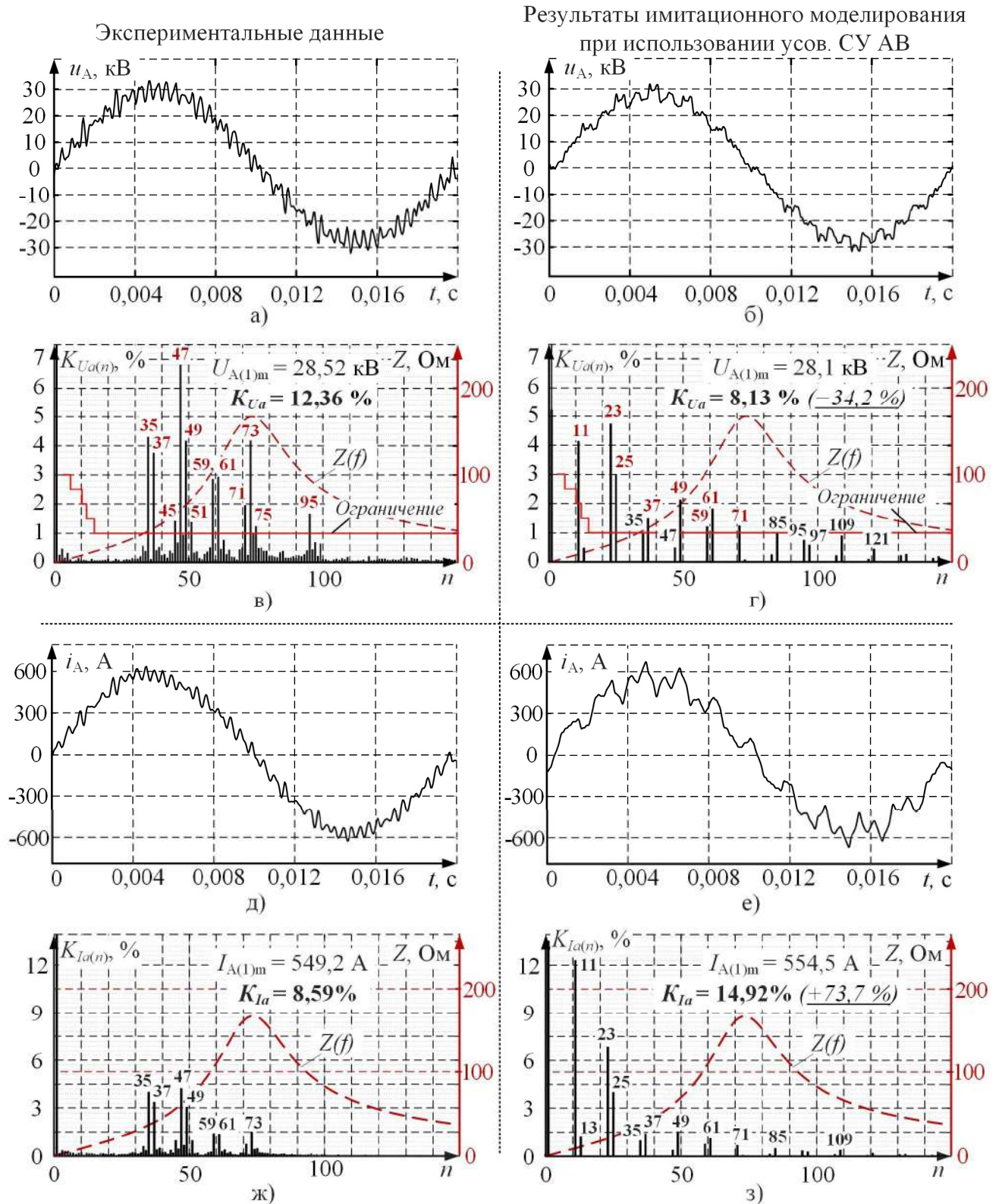


Рисунок 5.7 – Сравнительный анализ показателей качества электроэнергии для точки общего присоединения внутривоздушных потребителей ЗАО «ММК Metalurji» при использовании усовершенствованной СУ АВ (б,г,е,з) и экспериментальных данных (а,в,д,ж) для режима работы под нагрузкой



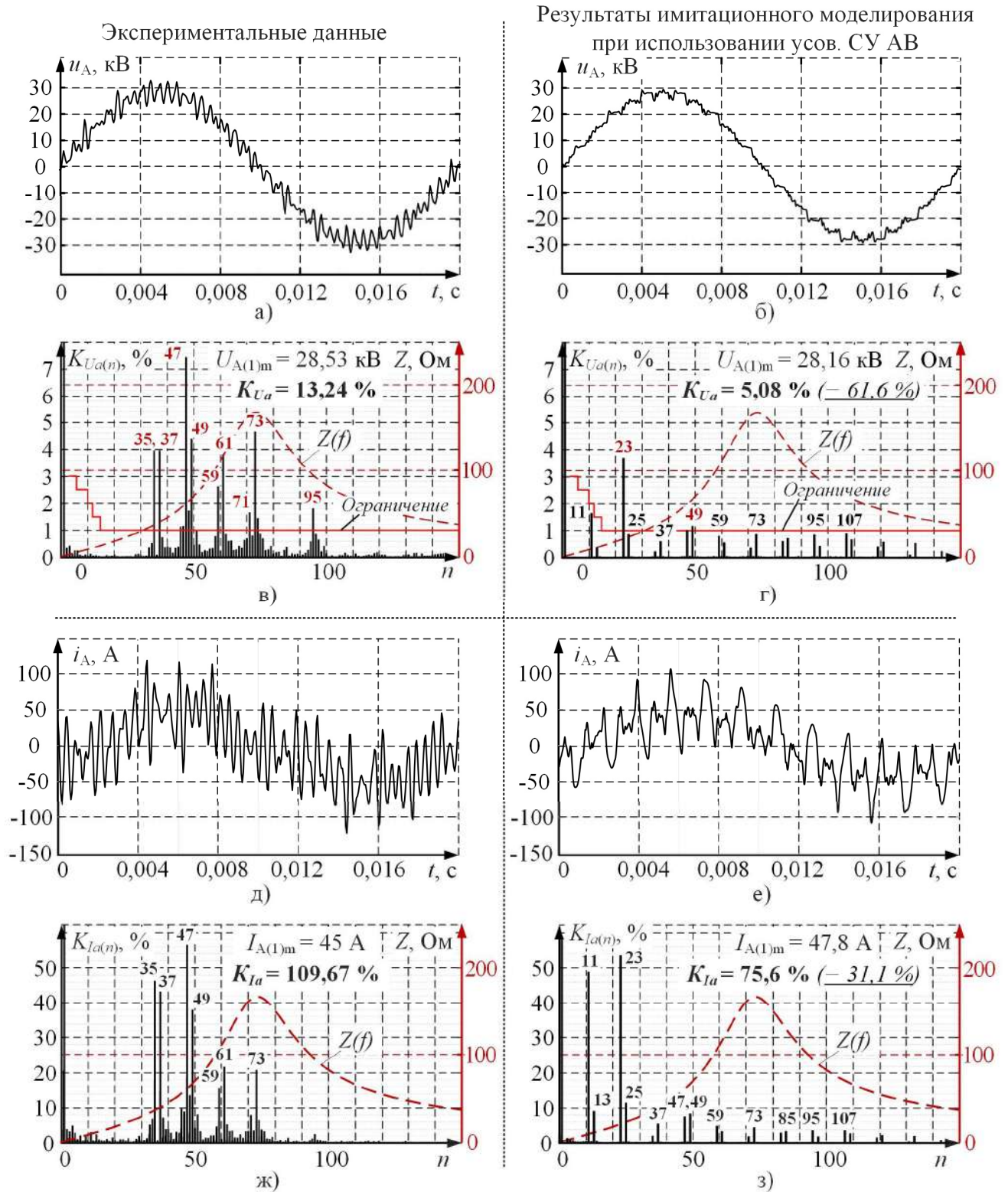


Рисунок 5.8 – Сравнительный анализ показателей качества электроэнергии для точки общего присоединения внутривоздушных потребителей ЗАО «ММК Metalurji» при использовании усовершенствованной СУ АВ (б,г,е,з) и экспериментальных данных (а,в,д,ж) для режима работы без нагрузки

Для удобства сравнения основные результаты имитационного моделирования работы электротехнического комплекса ЗАО «ММК Metalurji» при использовании усовершенствованной СУ АВ и экспериментальных исследований представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Результаты сравнительного анализа эффективности применения усовершенствованной СУ АВ в электроприводах стана горячей прокатки 1750 ЗАО «ММК Metalurji»

Показатель	Режим работы	Исходный вариант	Применение усов. СУ АВ
Среднее значение коэффициента $K_U$ за цикл работы прокатного стана, %	—	12,96	5,22 (-59,7 %)
Среднее значение коэффициента в течение 95% времени интервала $K_{U,95\%}$ , %	—	12,92	5,19 (-59,8 %)
Минимальное значение коэффициента $K_U$ за цикл работы прокатного стана, %	—	9,15	3,99 (-56,4 %)
Максимальное значение коэффициента $K_U$ за цикл работы прокатного стана, %	—	13,5	5,81 (-57,0 %)
Среднее значение коэффициента $K_U$ , %	ЭП под нагрузкой	12,84	5,65 (-56,0 %)
	ЭП на х.х.	13,48	5,09 (-62,2 %)
Количество гармоник напряжения, не соответствующих требованиям ГОСТ 32144-2013, шт.	ЭП под нагрузкой	12	8 (-33,3 %)
	ЭП на х.х.	9	2 (-77,8 %)

## 5.2. Анализ эффективности применения усовершенствованной СУ АВ в электроприводах стана холодной прокатки ЧерМК ПАО «Северсталь»

При проведении имитационного моделирования работы ПЧ с усовершенствованной СУ АВ учитывались нагрузки, представленные на рисунке 2.13 д). Полученные в результате величины коэффициента  $K_U$  для различных участков внутривозвратной системы электроснабжения приведены на рисунке 5.9. Все представленные далее исследования проводились для параллельного режима работы секций 1 и 2 ЗРУ-10 кВ ГПП-2 ЧерМК при питании от одного понизительного трансформатора 110/10 кВ.

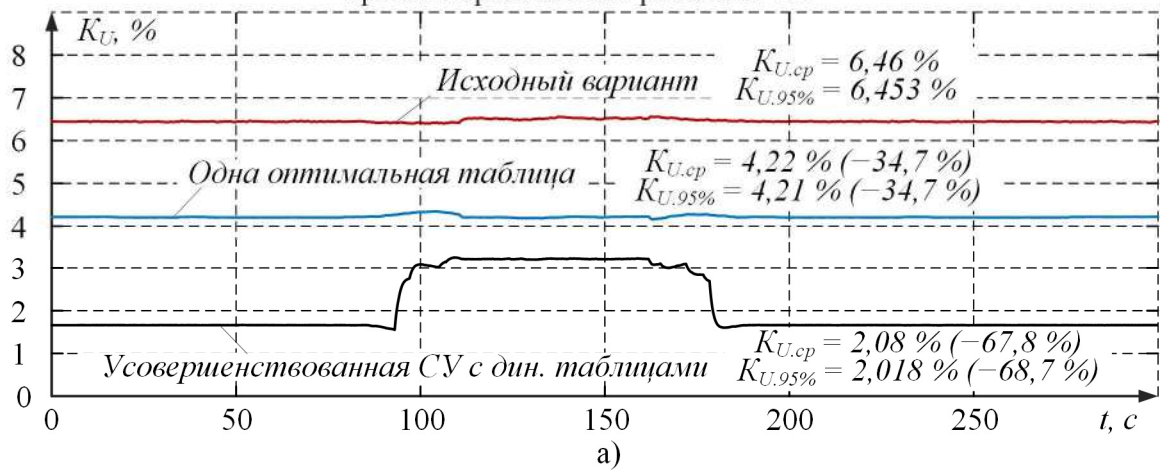
Использование усовершенствованной СУ АВ с динамическим выбором таблиц углов переключения обеспечивает снижение средней величины  $K_{U,ср}$  для точки общего присоединения за цикл работы стана холодной прокатки на 67,8 %. Для режима работы при прокатке листа станом эффект несколько меньше – 50,8 %, максимальная же результативность достигается при работе главных электроприводов на холостом ходу – 75,8 %. Применение СУ АВ с только одной оптимальной таблицей на исходной частоте коммутации силовых ключей позволяет снизить  $K_{U,ср}$  на 34,7 %.

Иная ситуация складывается для секций распределительной подстанции РП-19, питающей главные электропривода стана. Частотные характеристики для данных участков сети имеют экстремумы в районе 109 и 123 гармоник для 1 и 2 секции соответственно. Использование в усовершенствованной СУ АВ таблиц углов переключения по методу ШИМ с УВГ с удалением значимых гармонических составляющих с номерами от 5 до 61 приводит к усилению оставшихся. В результате чего происходит ухудшение ПКЭ для секции 1 РП-19 – средняя величина  $K_{U,ср}$  увеличилась на 20,2 %. В случае секции 2 зафиксировано снижение данного коэффициента на 18,5 %.

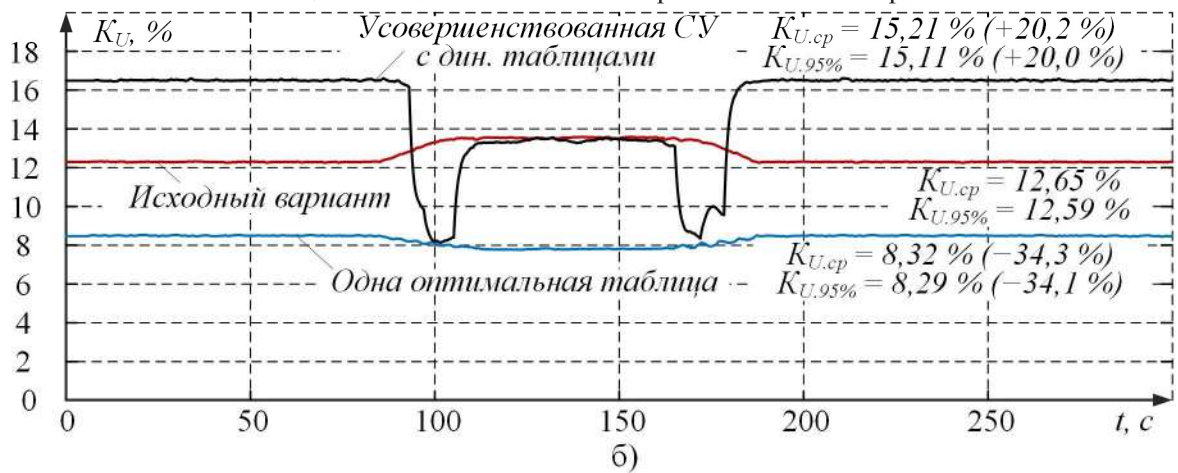
Наибольшую важность представляет улучшение ПКЭ именно для точки общего присоединения, т.к. от секций РП-19 запитаны только ПЧ-АВ ЭП стана. В



Секции 1 и 2 ЗРУ-10 кВ ГПП-2 ЧерМК ПАО «Северсталь»  
при их параллельной работе от 2Т



Секция 1 ЗРУ-10 кВ РП-19 ЧерМК ПАО «Северсталь»



Секция 2 ЗРУ-10 кВ РП-19 ЧерМК ПАО «Северсталь»

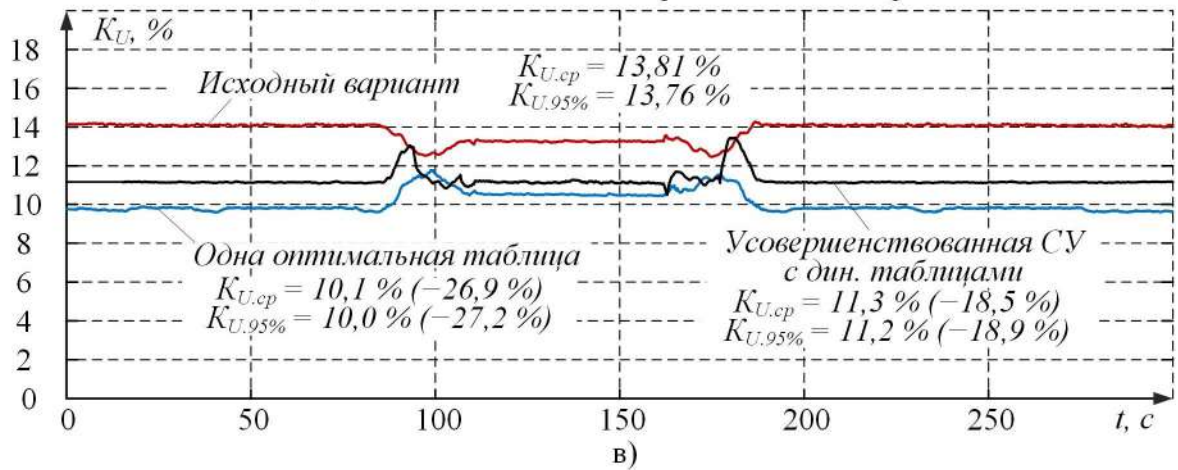


Рисунок 5.9 – График изменения коэффициента  $K_U$  за цикл работы прокатного стана для а) секции 1 и 2 ЗРУ-10 кВ ГПП-2 при их параллельной работе от 2Т, б) секции 1 и в) секции 2 ЗРУ-10 кВ РП-19 ЧерМК ПАО «Северсталь»

тоже время необходимо, чтобы блок ФАПЧ данных преобразователей работали устойчиво в условиях сильного искажения синусоиды питающего напряжения.

На рисунке 5.10 показаны три выбранных интервала времени для осуществления подробного исследования показателей качества электроэнергии на шинах секций ГПП-2 при использовании усовершенствованной СУ АВ электроприводов стана холодной прокатки.

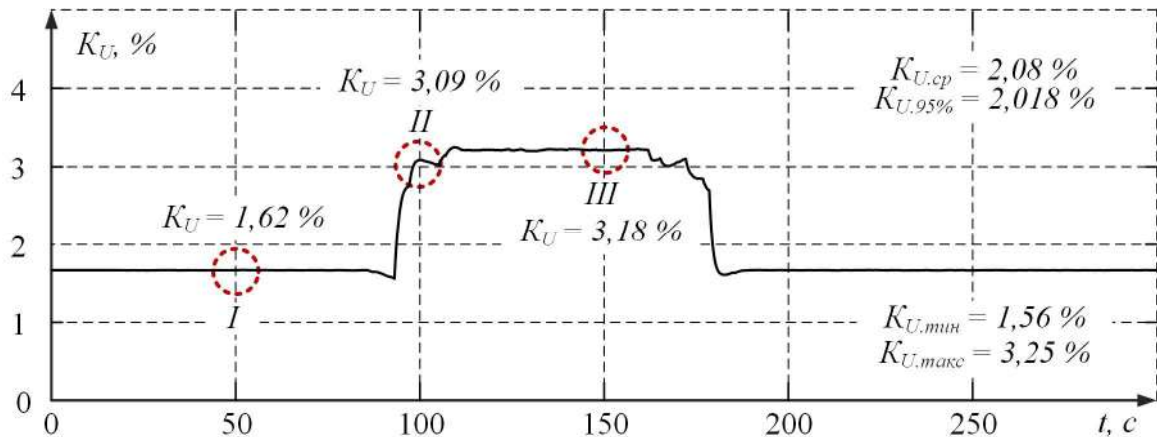


Рисунок 5.10 – Выбранные интервалы времени для проведения детального анализа ПКЭ при использовании усовершенствованной СУ АВ

На рисунке 5.11 приведены осциллограммы фазных напряжений и токов для секций ГПП-2, а также их гармонические составы, полученные на имитационной модели для интервала I. В рассматриваемый момент времени все электропривода работают на заправочной скорости стана и без нагрузки. Усовершенствованная СУ АВ применяется таблицы углов переключения с максимальной частотой коммутации IGBT-тиристоров, благодаря чему удаётся удалить из гармонического спектра потребляемого тока все гармоники вплоть до 41. Значение  $K_U$  для фазы А составило 1,62 %, что не превосходит величину ограничения для сетей 6-25 кВ в 5 % [95]. На значимом уровне в гармоническом спектре напряжения присутствуют гармоники с номерами 41, 43, 71, 83, 91. Их величины не превышают 1 % от величины первой гармоники.

На рисунке 5.12 рассмотрен интервал II. В этот момент времени происходит разгон стана холодной прокатки с листом металла с заправочной скорости до заданной скорости прокатки. Этот режим характеризуется постепенным ростом токов АВ. На рассматриваемом интервале усовершенствованная СУ АВ использует

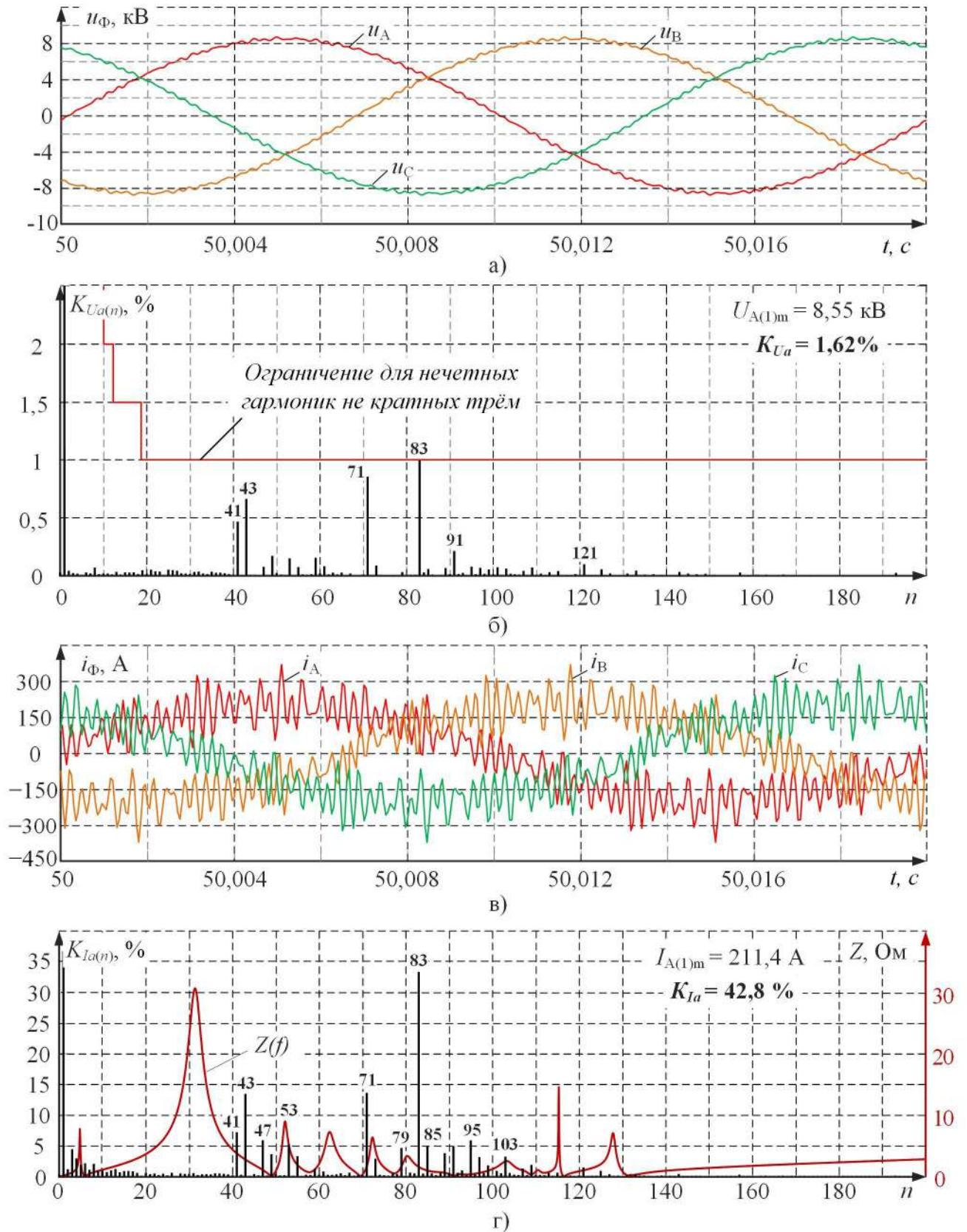


Рисунок 5.11 – Анализ показателей качества электроэнергии для секций ГПП-2 ЧерМК ПАО «Северсталь» при использовании усовершенствованной СУ АВ для исследуемого интервала I



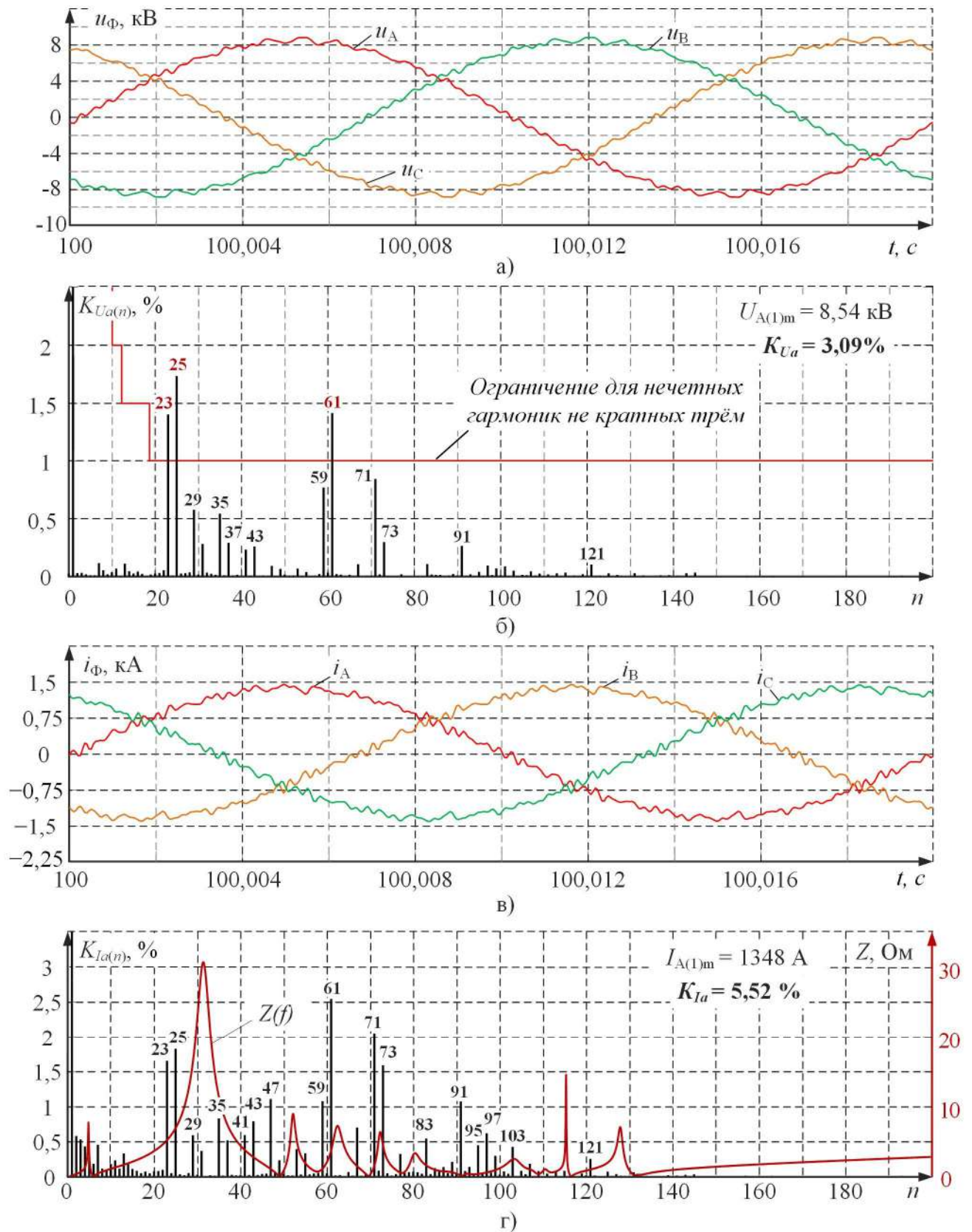


Рисунок 5.12 – Анализ показателей качества электроэнергии для секций ГПП-2 ЧерМК ПАО «Северсталь» при использовании усовершенствованной СУ АВ для исследуемого интервала II

наборы углов с меньшим количеством переключений за  $1/4$  периода по сравнению с режимом холостого хода. Соответственно удаляется меньшее количество гармоник. Величина  $K_U$  увеличилась и составила 3,09 %. Также величины гармоник напряжения с номерами 23, 25, 61 выходят за установленные лимиты.

На рисунке 5.13 показан последний исследуемый интервал времени III для режима работы стана с заданной скоростью прокатки, при котором все главные электропривода стана работают с максимальной нагрузкой. Из-за применения усовершенствованной СУ АВ таблиц углов переключения с более низкой частотой коммутации полупроводниковых вентилях и соответственно меньшим количеством удаляемых гармоник величина  $K_U$  достигает 3,18 %. Гармонические составляющие напряжения с номерами 11 и 37 превосходят величины ограничений, установленных стандартом ПКЭ [95]. В тоже время необходимо отметить, что использование усовершенствованной СУ АВ позволяет снизить величину  $K_U$  для точки общего присоединения ниже установленного ограничения в 4 %.

На рисунках 5.14 проведён сравнительный анализ показателей качества электроэнергии секций 1 и 2 ЗРУ-10 кВ ГПП-2 ЧерМК ПАО «Северсталь» при их параллельной работе от 2Т, полученных при проведении экспериментальных исследований и при помощи имитационного моделирования работы электротехнического комплекса с усовершенствованной СУ АВ. В первом случае величина  $K_{Ua}$  составила 7,14 %, величины гармоник напряжения с номерами 23, 25, 29, 37 нарушали установленные нормы качества электроэнергии. Применение усовершенствованной СУ АВ позволило снизить  $K_{Ua}$  на 55,5 % до значения 3,18 %. Значения гармоник напряжения с номерами 11 и 37 несколько превышают ограничения.

Для удобства сравнения основные результаты имитационного моделирования работы электротехнического комплекса района ГПП-2 ЧерМК ПАО «Северсталь» при использовании усовершенствованной СУ АВ и экспериментальных исследований для точки общего присоединения внутризаводских потребителей представлены в таблице 5.2.



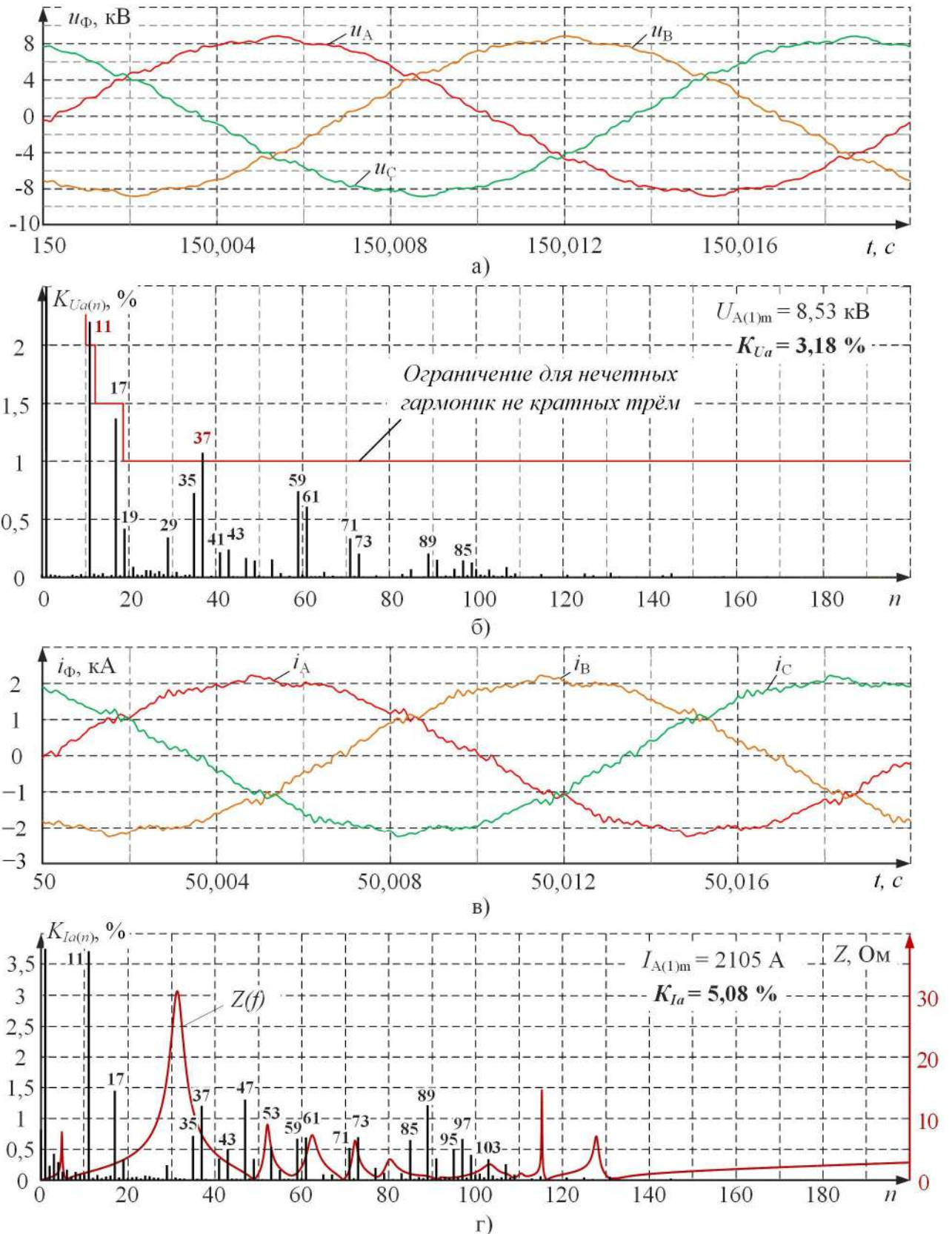


Рисунок 5.13 – Анализ показателей качества электроэнергии для секций ГПП-2 ЧерМК ПАО «Северсталь» при использовании усовершенствованной СУ АВ для исследуемого интервала III

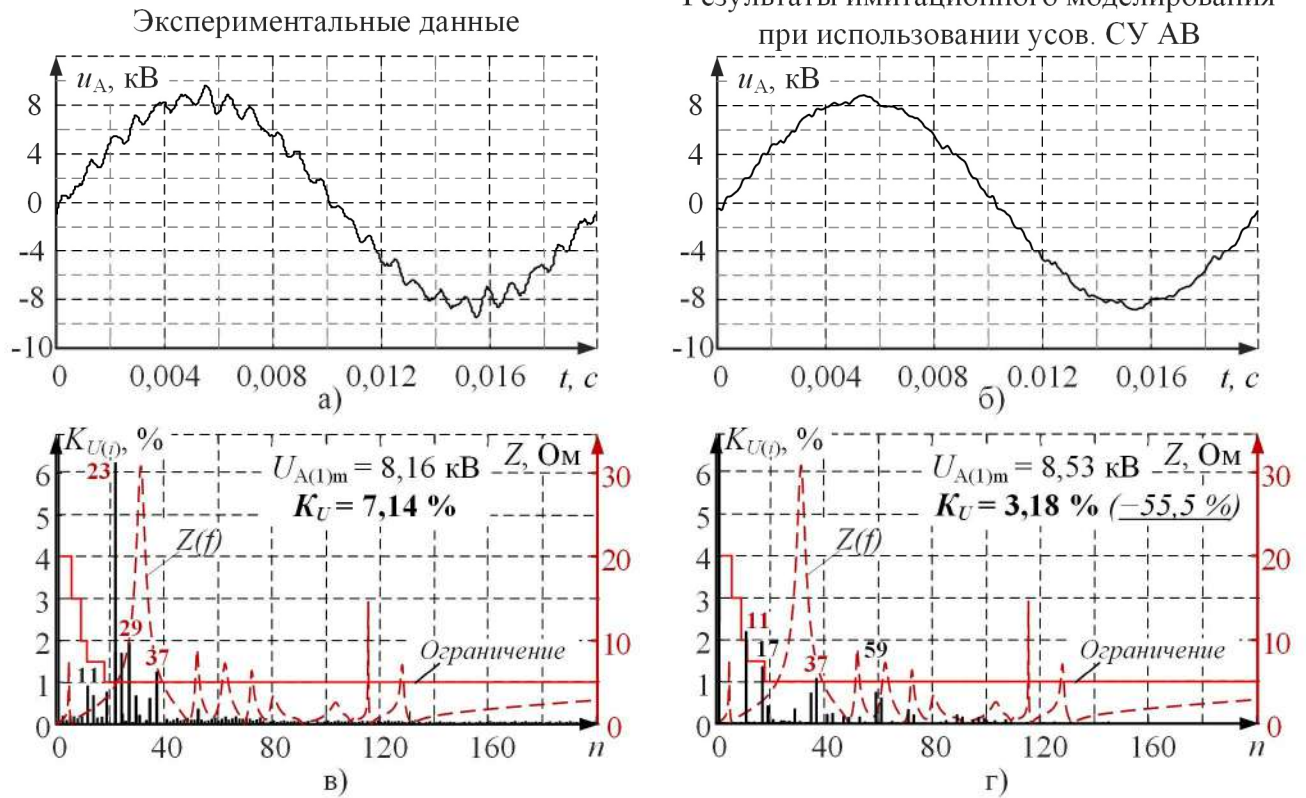


Рисунок 5.14 – Сравнительный анализ показателей качества электроэнергии для точки общего присоединения внутривоздушных потребителей ЧерМК ПАО «Северсталь» при использовании усовершенствованной СУ АВ (б,г) и экспериментальных данных (а,в) при параллельной работе секций ГПП-2

Таблица 5.2 – Результаты сравнительного анализа эффективности применения усовершенствованной СУ АВ в электроприводах стана холодной прокатки ЧерМК ПАО «Северсталь» для секций 1 и 2 ГПП-2

Показатель	Режим работы	Исходный вариант	Применение усов. СУ АВ
Среднее значение коэффициента $K_U$ за цикл работы прокатного стана, %	—	6,46	2,08 (-67,8 %)
Среднее значение коэффициента в течение 95% времени интервала $K_{U.95\%}$ , %	—	6,453	2,018 (-68,7 %)
Минимальное значение коэффициента $K_U$ за цикл работы прокатного стана, %	—	6,40	1,56 (-75,6 %)

Продолжение таблицы 5.2

Максимальное значение коэффициента $K_U$ за цикл работы прокатного стана, %	—	6,56	3,31 (-57,0 %)
Среднее значение коэффициента $K_U$ , %	ЭП под нагрузкой	6,49	3,19 (-50,8 %)
	ЭП на х.х.	6,44	1,56 (-75,8 %)
Количество гармоник напряжения, не соответствующих требованиям ГОСТ 32144-2013, шт.	ЭП под нагрузкой	4	2 (-50 %)
	ЭП на х.х.	4	0

### 5.3. Выводы по главе 5

1. Произведён анализ эффективности усовершенствованной СУ АВ при её использовании в ПЧ-АВ в составе электроприводов стана горячей прокатки 1750 ЗАО «ММК Metalurji». Положительный технический эффект в виде снижения средней величины  $K_{U.cp}$  для секции Д ЗРУ-34,5 кВ 51EDM за цикл работы прокатного стана составил 59,7 %. В зависимости от режима работы электроприводов эффективности усовершенствованной СУ АВ отличается: уменьшение величины  $K_{U.cp}$  при работе под нагрузкой составило 56,0 %, максимальная же эффективность достигается для режима без нагрузки – -62,2 %.

2. Аналогичные исследования были произведены для внутриваровской распределительной сети района ГПП-2 ЧерМК ПАО «Северсталь». Применение усовершенствованной СУ АВ в ПЧ ЭП стана холодной прокатки позволяет снизить их негативное влияние на питающую сеть, что проявляется в виде уменьшения величины  $K_{U.cp}$  для секций ЗРУ-10 кВ ГПП-2 на 67,8 % за цикл работы стана. Максимальное значение  $K_U$ , согласно расчётам, достигло 3,31 %, что не превышает нормативный уровень в 5 %, установленный согласно ГОСТ 32144-2013.

3. Применение усовершенствованной СУ АВ позволяет значительно улучшить ЭМС ПЧ с питающей сетью особенно в режимах работы со сниженной нагрузкой или без неё. Это позволит нормализовать работу чувствительных

электроприёмников при штатном режиме электроснабжения. Также стоит отметить, что внедрение предлагаемой СУ АВ не требует серьёзных капитальных затрат в отличие от других способов обеспечения ЭМС ПЧ-АВ, таких как: применение специализированных фильтрокомпенсирующих устройств, создание отдельной «грязной» секции, коррекция частотной характеристики питающей сети за счёт изменения конфигурации системы электроснабжения (снижение или увеличение результирующей ёмкости кабельных линий).

4. Результаты диссертационной работы были переданы специалистам компании-производителя ПЧ-АВ серии ACS6000 АВВ и внедрены на ПЧ-АВ в составе электроприводов прокатных станов ЗАО «ММК Metalurji» и ЧерМК ПАО «Северсталь» (приложения Д и Е). Разработанная усовершенствованная система управления может быть использована также для ПЧ-АВ других фирм, используемых в составе мощных электроприводов промышленных агрегатов металлургических заводов России и стан зарубежья, работающих в циклическом режиме.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 внутривозовского 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 станов 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. Дёртйол, 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.



**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Николаев, А. А. Исследование влияния провалов напряжения в системе электроснабжения завода ММК Metalurji на работу главных электроприводов стана горячей прокатки / А. А. Николаев, А. С. Денисевич, И. А. Ложкин, М. М. Тухватуллин // Электротехнические системы и комплексы. – 2015. – №3 (28). – С. 8-14.
2. Hosoda, H. Recent Hot Strip Mill in China / H. Hosoda, S. Wada, S. Kodama and Li Junfeng // 2005 International Conference on Power Electronics and Drives Systems. – Kuala Lumpur. – 2005. – С. 1078-1083. – DOI: 10.1109/PEDS.2005.1619848.
3. Маклаков, А. С. Имитационное моделирование главного электропривода прокатной клетки толстолиствого стана 5000 / А. С. Маклаков // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. - 2014. - № 3. - С. 16-25.
4. 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 18th International Scientific Technical Conference Alternating Current Electric Drives, ACED 2021 - Proceedings : 18, Ekaterinburg, 24–27 мая 2021 года. – Ekaterinburg, 2021. – С. 1-8. – DOI 10.1109/ACED50605.2021.9462264.
5. 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. A. Nikolaev, A. S. Maklakov, M. V. Bulanov, I. G. Gilemov, A. A. Denisevich, M. V. Afanasev // Energies. – 2022. – Т. 16. – № 1. – С. 293.
6. Rodriguez, J. Multilevel voltage-source-converter for industrial medium-voltage drives / J. Rodriguez, S. Bernet, B. Wu, J. O. Pontt, S. Kouro // IEEE Transactions on Industrial Electronics – 2007. – Т. 54. – № 6. – С. 2930–2945.
7. Abu-Rub, H. Medium voltage multilevel converters - state of the art, challenges and requirements in industrial applications / H. Abu-Rub, J. Holtz, J. Rodriguez, G. Baoming // IEEE Transactions on Industrial Electronics – 2010. – vol. 57, – № 8. – pp. 2581–2596.
8. Jing, T. A review of voltage source converters for energy applications / T. Jing, A.S. Maklakov // in Proc. 2018 International Ural Conference on Green Energy, – 2018. – С. 275–281.

9. Uddin, S. M. M. Robust Model Predictive Control for AFE-Inverter Drives With Common Mode Voltage Elimination / S. M. M. Uddin, G. Mirzaeva, G. C. Goodwin // in IEEE Open Journal of Industry Applications. – 2022. – T. 3. – C. 114-124. – DOI: 10.1109/OJIA.2022.3177862.
10. Pontt, J. Mitigation of noneliminated harmonics of SHEPWM three-level multipulse three-phase active front end converter with low switching frequency for meeting standard IEEE519-92 / J. Pontt, J. Rodriguez, R. Huerta // IEEE Transactions on Power Electronics – 2004. – T. 19. – № 6. – C. 1594–1599.
11. Zhang, Z. Active EMI Reduction Technique of Active Front End (AFE) Drives Based on Randomized Switching Frequency PWM / Z. Zhang, L. Wei, Y. Cui, P. S. Murthy, P. Yi // 2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). – Baltimore, USA. – 2019. – C. 6438-6442. – DOI: 10.1109/ECCE.2019.8912893.
12. Cao, J. Research on a high power inverter with low frequency modulation index by selective harmonic mitigation technique / J. Cao, S. Xie, J. Xu // in Proc. 9th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia. – Jun. 2015. – C. 2409–2414.
13. Wu, B. High-power converters and AC drives / B. Wu, M. Narimani. – 2nd ed. New Jersey: Wiley-IEEE Press. – 2017. – 480 c.
14. Wei, L. Active front end rectifier design trade-off between PWM and direct power control method / L. Wei, Y. Patel, C.S.N. Murthy // in Proc. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. – 2014. – C. 1015–1021.
15. Maklakov, A.S. Finding the best programmable PWM pattern for three-level active front-ends at 18-pulse connection / A.S. Maklakov, T. Jing, A.A. Radionov, V.R. Gasiyarov, T.A. Lisovskaya // Machines – 2021. – T. 9. – № 7. – C. 127.
16. O'Brien K., Teichmann R., Bernet S. Active rectifier for medium voltage drive systems // Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC 2001. Sixteenth Annual IEEE). - 2001. - C. 557-562.
17. Ewanchuk, J. A five-/nine-level twelve-switch neutral-point-clamped inverter for high-speed electric drives / J. Ewanchuk, J. Salmon, B. Vafakhah // IEEE Transactions on Industrial Electronics – 2011. – T. 47. – № 5. – C. 2145–2153.
18. Karami, M. Comparison of Three-Level and Two-Level Converters for AFE Application / M. Karami, R. Tallam and R. Cuzner // 2018 IEEE 6th Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications (WiPDA). – Atlanta, GA, USA. – 2018. – C. 264-270. – DOI: 10.1109/WiPDA.2018.8569159.

19. Turnbull, F.G. Selected harmonic reduction in static dc-ac inverters / F.G. Turnbull // IEEE Transactions on Communication and Electronics – 1964. – T. CE-83. – № 73. – C. 374–378.
20. Patel, H.S. Generalized techniques of harmonic elimination and voltage control in thyristor inverters: Part I—harmonic elimination / H.S. Patel, R.G. Hoft // IEEE Transactions on Industry Applications – 1973. – T. IA-9. – № 3. – C. 310–317.
21. Patel, H.S. Generalized techniques of harmonic elimination and voltage control in thyristor inverters: Part II—voltage control techniques / H.S. Patel, R.G. Hoft // IEEE Transactions on Industry Applications – 1973. – T. IA-10. – № 5. – C. 666–673.
22. Sun, J. Solving nonlinear equations for selective harmonic eliminated PWM using predicted initial values / J. Sun, H. Grotstollen // in Proc. IEEE International Conference on Industrial Electronics, Control, Instrumentation, and Automation. – Nov. 1992. – C. 259–264.
23. Abu-Rub, H. Medium-voltage drives: Challenges and the existing technology / H. Abu-Rub, S. Bayhan, M. Malinowski, S. Moinoddin J. Guzinski // IEEE Power Electronics Magazine. – 2016. – T. 3. – № 2. – C. 29–41.
24. Xia, C. Adjustable proportional hybrid SVPWM strategy for neutral-pointclamped three-level inverters / C. Xia, H. Shao, Y. Zhang, X. He // IEEE Transactions on Industrial Electronics – 2013. – T. 60. – № 10. – C. 4234–4242.
25. Rodriguez, J. Multilevel converters: An enabling technology for high-power applications // J. Rodriguez, L.G. Franquelo, S. Kouro, J.I. Leon, R.C. Portillo, M.A.M. Prats, M. A. Perez // Proc. IEEE. – 2009. – T. 97. – № 11. – C. 1786–1817.
26. Gabour, N.E.H. Enhanced harmonic elimination using genetic algorithm optimization in multilevel inverters / N.E.H. Gabour, F. Habbi, M. Bounekhla, E.G. Boudissa // in Proc. 18th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices. – Mar. 2021. – C. 323–329.
27. Mohammed, S.A. A review of the state-of-the-art of power electronics for power system applications / S.A. Mohammed, Abdel-Moamen M. A, B. Hasanin // International Journal of Electronics and Communication Engineering – 2013. – T. 1. – № 1. – C. 43–52.
28. Rabiul Islam, M. State-of-the-Art of the Medium-Voltage Power Converter Technologies for Grid Integration of Solar Photovoltaic Power Plants / M. Rabiul Islam, A. M. Mahfuz-Ur-Rahman, K. M. Muttaqi, D. Sutanto // in IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2019. – T. 34. – № 1. – C. 372–384. – DOI: 10.1109/TEC.2018.2878885.

29. Bose, B.K. Modern power electronics and AC drives / B.K. Bose. –1st ed. New Jersey: Prentice Hall PTR, 2002. – 711 с.
30. Li, J. Three-level active neutral-point-clamped zero-current transition converter for sustainable energy systems / J. Li, J.J. Liu, D. Boroyevich, P. Mattavelli, .Y.S. Xue // IEEE Transactions on Power Electronics – 2011. – Т. 26. – № 12. – С. 3680–3693.
31. Mittal, N. Multilevel inverters: A literature survey on topologies and control strategies / N. Mittal, B. Singh, S.P. Singh, R. Dixit, D. Kumar // in Proc. 2nd International Conference on Power, Control and Embedded Systems. – Dec. 2012. – С. 1–11.
32. Okba, M.H. High voltage direct current transmission - A review, part II - converter technologies / M.H. Okba, M.H. Saied, M.Z. Mostafa, T.M. Abdel-Moneim // in Proc. IEEE Energytech. – May. 2012. – С. 1–7.
33. Attaianese, C. Three-phase three-level active NPC converters for high power system / C. Attaianese, M. Di Monaco, G. Tomasso // in Proc. International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion. – Jun. 2010. – С. 204–209.
34. Абулвелеев И. Р. Принципы построения векторной широтно-импульсной модуляции для трехуровневого инвертора / И. Р. , Т. Р. Храмшин, Г. П. Корнилов, Г. В. Никифоров // Электротехнические системы и комплексы. – 2016. – № 4(33). – С. 72–77.
35. Храмшин, Т. Р. Математическая модель силовой схемы главных электроприводов прокатных станов / Т. Р. Храмшин, Д. С. Крубцов, Г. П. Корнилов // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2014. – Т. 1. – № 1. – С. 3-7.
36. 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. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-3\(56\)-44-53](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-3(56)-44-53)
37. Храмшин, Т.Р. Оценка методов широтно-импульсной модуляции напряжения активных выпрямителей прокатных станов / Т.Р. Храмшин, Д.С. Крубцов, Г.П. Корнилов // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2013. – №2. – С. 48–52.
38. Haijun, T. Study of Control Strategy Based Dual-PWM Converter under Unbalanced Input Voltage Condition / T. Haijun, H. Di // Advances in Electronic Engineering, Communication and management. Lecture Notes in Electrical Engineering. – Т.139. – 2012. – С. 267-272.

39. Jose, I.L. The essential role and the continuous evolution of modulation techniques for voltage-source inverters in the past, present, and future power electronics / I. L. Jose, J. I. Leon, S. Kouro, L. G. Franquelo, J. Rodriguez, B. Wu. // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2016. – Т. 63. – № 5. – С. 2688–2701.
40. Kouro, S. Predictive control based selective harmonic elimination with low switching frequency for multilevel converters / S. Kouro, B. L. Rocca, P. Cortes, S. Alepuz, W. Bin, J. Rodriguez // in *Proc. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*. – Sept. 2009. – С. 3130–3136.
41. Moeini, A. Improve control to output dynamic response and extend modulation index range with hybrid selective harmonic current mitigation-PWM and phase-shift PWM for four-quadrant cascaded H-bridge converters / A. Moeini, H. Zhao, S. Wang // *IEEE Transactions on Industrial Electronics* – 2017. – Т. 64. – № 9. – С. 6854–6863.
42. Patil, S.D. Improved control strategy for harmonic mitigation in multilevel inverter / S.D. Patil, A. Kadu, P. Dhabe // in *Proc. 5th International Conference on Intelligent Computing and Control Systems*. – 2021. – С. 727–732.
43. Wen, B. AC stability analysis and dq frame impedance specifications in powerelectronics-based distributed power systems // B. Wen, R. Burgos, D. Boroyevich, P. Mattavelli, Z. Shen // *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. – 2017. – Т. 5. – № 4. – С. 1455–1465.
44. Uddin, M. Computationally Efficient Model Predictive Control for AC-DC-AC Converter with Common Mode Voltage Elimination / M. Uddin, G. Mirzaeva, G. Goodwin, P. Zanchetta // *2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Portland, USA. – 2018, – С. 6418-6423. – DOI: 10.1109/ECCE.2018.8557733.
45. Zhang, Z. Computationally efficient predictive control of grid-tied three-level NPC active-front-ends: A CPS based solution / Z. Zhang, Z. Lu, B. Sun // *2017 Chinese Automation Congress (CAC)* – Jinan, China, 2017. – С. 4622-4627. – DOI: 10.1109/CAC.2017.8243595.
46. Шрейнер, Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты / Р.Т. Шрейнер – Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.
47. Чуприна Н.В., Пугачев А.А. Моделирование системы векторного управления тяговым синхронным двигателем с постоянными магнитами / Н. В.



Чуприна, А. А. Пугачев // Электротехнические системы и комплексы. – 2022. – № 2(55). – С. 10-17. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2\(55\)-10-17](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2(55)-10-17)

48. Patangia, H. Sectionalized PWM (S-PWM): A new multilevel modulation strategy / H. Patangia, D. Gregory // 2008 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. – Seattle, WA, USA, 2008. – С. 3041-3044. – DOI: 10.1109/ISCAS.2008.4542099.

49. Azeddine, D. A space vector modulation based three-level PWM Rectifier under Simple Sliding Mode Control Strategy / D. Azeddine, M. Senior // Energy and power Engineering. – 2013. – №5. – С. 28-35.

50. Hashir, S. A novel hybrid PWM method for DC-link voltage balancing in a three level neutral point clamped inverter / S. Hashir, J. Francis, R. Sreepriya // in Proc. International Conference on Power, Signals, Control and Computation. – 2018. – С. 1–6.

51. Jiang, W. Hybrid PWM strategy of SVPWM and VSVPWM for NPC three level voltage-source inverter / W. Jiang, S. Du, L. Chang, Y. Zhang, Q. Zhao // IEEE Transactions on Power Electronics – 2010. – Т. 25. – № 10. – С. 2607–2619.

52. Wu, X. A hybrid PWM strategy for three-level inverter with unbalanced DC links / X. Wu, G. Tan, G. Yao, C. Sun, G. Liu // IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. – 2018. – Т. 6. – № 1. – С. 1–15.

53. Абулвелеев, И.Р. Формирование шаблонов переключений трехуровневого инвертора с векторной широтно-импульсной модуляцией / И. Р. Абулвелеев, Т. Р. Храмшин, Г. П. Корнилов [и др.] // Электротехнические системы и комплексы. – 2019. – № 1(42). – С. 45–52.

54. Маклаков, А.С. Алгоритм пространственно-векторной модуляции трехуровневого преобразователя / А.С. Маклаков, Е.А. Маклакова, Е.В. Антонова., М.А. Демов // Актуальные вопросы энергетики: материалы Всероссийской научной конференции студентов, магистрантов, аспирантов. – Омск, 2016. – С. 100-106.

55. Ghijselen, J. A. L. Dynamic control of a fixed pattern rectifier / J. A. L. Ghijselen, A. P. M. Van den Bossche, J. A. A. Melkebeek // 30th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Record. (Cat. No.99CH36321). – Charleston, SC, USA, 1999, – Т. 2. – С. 771-776. DOI: 10.1109/PESC.1999.785597.

56. Ghijselen, J. A. L. Dynamic control of a fixed pattern rectifier / J. A. L. Ghijselen, A. P. M. Van den Bossche, J. A. A. Melkebeek // in IEEE Transactions on Power Electronics. – 2001. – Т. 16. – №. 1. – С. 118-124. DOI: 10.1109/63.903996.

57. Ogawa, R. Multilevel Fixed Pulse Pattern Control for Medium-Voltage High-Frequency Inverter / R. Ogawa, M. Takiguchi, Y. Tadano // IEEJ J. Ind. Appl., – 2021. – T. 10. – №. 6. – C. 652-662.
58. Ogawa, R. Multilevel Fixed Pulse Pattern Control for Medium-Voltage High-Frequency Inverter / R. Ogawa, M. Takiguchi, Y. Tadano // 2020 23rd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). – Hamamatsu, Japan, 2020. – C. 2089-2094. DOI: 10.23919/ICEMS50442.2020.9291237.
59. Zhang, F. Selective harmonic elimination PWM control scheme on a three-phase four-leg voltage source inverter / F. Zhang, Y. Yan // IEEE Transactions on Power Electronics – 2009. – T. 24. – № 7. – C. 1682–1689.
60. Agelidis, V.G. Multiple sets of solutions for harmonic elimination PWM bipolar waveforms: Analysis and experimental verification / V.G. Agelidis, A. Balouktsis, I. Balouktsis, C. Cossar // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2006. – T. 21. – № 2. – C. 415–421.
61. Guzman, J.I. Digital implementation of selective harmonic elimination techniques in modular current source rectifier / J.I. Guzman, P.E. Melin, J.R. Espinoza, L.A. Moran, C.R. Baier, J.A. Munoz, G.A. Guinez // IEEE Transactions on Industrial Informatics – 2013. – T. 9. – № 2. – C. 1167–1177.
62. Maswood, I. Optimal PWM-SHE switching on NPC inverter: A winning match for high power conversion / I. Maswood, M.H. Rashid, L. Jian // Electric Power Systems Research – 1998. – T. 48. – № 1. – C. 19–24.
63. Rashid, M. I. M. Optimal HE-PWM inverter switching patterns using differential evolution algorithm / M. I. M. Rashid, G. Konstantinou, V. G. Agelidis // in Proc. IEEE International Conference on Power and Energy. – 2012. – C. 32–37.
64. Wang, Y. Selective harmonic elimination PWM technology applied in PMSMs / Y. Wang, X. Wen, F. Zhao, X. Guo // in Proc. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. – 2012. – C. 92–97.
65. Wells, J.R. Selective harmonic control: A general problem formulation and selected solutions / J.R. Wells, B.M. Nee, P.L. Chapman, P.T. Krein // IEEE Transactions on Power Electronics – 2005. – T. 20. – № 6. – C. 1337–1345.
66. Chen, J.W. A novel design and implementation of programmed PWM to eliminated harmonics / J.W. Chen, T.J. Liang, S.H. Wang // in Proc. IEEE International Conference on Industrial Electronics, Control, Instrumentation, and Automation. – 2005. – C. 1278–1283.

67. Aguilera, R.P. Selective Harmonic Elimination Model Predictive Control for Multilevel Power Converters / R.P. Aguilera, P. Acuña, P. Lezana, G. Konstantinou, B. Wu; S. Bernet; Va. G. Agelidis // *IEEE Transactions on Power Electronics* – 2017. – Т. 32. – № 3. – С. 2416–2426.
68. Ahmad, S. A fast convergent homotopy perturbation method for solving selective harmonics elimination PWM problem in multi level inverter / S. Ahmad, A. Iqbal, M. Ali, K. Rahman, A.S. Ahmed // *IEEE Access* – 2021. – Т. 9. – С. 113040–113051.
69. Buccella, C. A deterministic harmonics mitigation technique for five-level inverters / C. Buccella, C. Cecati, M.G. Cioroni, K. Razi // in *Proc. IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. – 2014. – С. 1007–1013.
70. Campos-Gaona, D. Fast selective harmonic mitigation in multifunctional inverters using internal model controllers and synchronous reference frames / D. CamposGaona, R. Peña-Alzola, J. L. Monroy-Morales, M. Ordonez, O. Anaya-Lara, W. E. Leithead // *IEEE Transactions on Industrial Electronics* – 2017. – Т. 64. – № 8. – С. 6338–6349.
71. Dahidah, M. S. A. A review of multilevel selective harmonic elimination PWM: Formulations, solving algorithms, implementation and applications / M. S. A. Dahidah, G. Konstantinou, V. G. Agelidis // *IEEE Transactions on Power Electronics* – 2015. – Т. 30. – № 8. – С. 4091–4106.
72. González, F. J. Flexible harmonic control for three-level selective harmonic modulation using the exchange market algorithm / F. J. González, A. Marquez, J. I. Leon, S. Vazquez, L. G. Franquelo, J. Yin // in *Proc. IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. – 2018. – С. 5297–5302.
73. Jing, T. Comparative Analysis of the SHEPWM and SHMPWM Techniques for the Three-Level NPC Inverter based on the THD of Voltage and Current / T. Jing, A. S. Maklakov, A. A. Radionov, T. A. Lisovskay // in *Proc. Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice*. – 2020. – С. 113–118.
74. Nikolaev, A. A. Quality Improvement of Electric Power in the Intra-factory Electric Networks through the Use of PWM Algorithm Selective Harmonic Mitigation / A. A. Nikolaev, M. V. Bulanov, K. A. Shakhbieva // *Proceedings - 2020 Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research and Practice*, PEAMI 2020. – Магнитогорск, 2020. – С. 26-31. – DOI 10.1109/PEAMI49900.2020.9234357.

75. Semydyarov, A. Selective harmonic mitigation by time domain constrained optimization / A. Semydyarov, A. Ruderman // in Proc. 9th IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems. – 2018. – C. 1–6.
76. Sharifzadeh, M. Selective harmonic mitigation based self-elimination of triplen harmonics for single-phase five-level inverters / M. Sharifzadeh, H. Vahedi, R. Portillo, L. G. Franquelo, K. Al-Haddad // IEEE Transactions on Power Electronics – 2019. – T. 34. – № 1. – C. 86–96.
77. Zhou, K. Optimal selective harmonic control for power harmonics mitigation / K. Zhou, Y. Yang, F. Blaabjerg, D. Wang // IEEE Transactions on Industrial Electronics – 2015. – T. 62. – № 2. – C. 1220–1230.
78. Zhang, Z. Optimized Digital Implementation of Carrier-based Randomized Discontinuous PWM Technique for Active Front End (AFE) Drives / Z. Zhang, L. Wei, P. Yi, P. S. Murthy, Y. Cui // 2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). – 2019. – DOI:10.1109/ecce.2019.8913314
79. Farhan, B. Space Vector Pulse Width Modulation Technique Based Design and Simulation of a Three-Phase Voltage Source Converter System / B. Farhan // World Academy of Science, Engineering and Technology. – 2014. – №9. – C. 1304-1307.
80. Dahidah, M. S. A. On comparing the symmetrical and non-symmetrical selective harmonic elimination pulse-width modulation technique for two-level three-phase voltage source converters / M. S. A. Dahidah, G. Konstantinou, N. Flourentzou, V. G. Agelidis // IET Power Electronics – 2010. – T. 3. – № 6. – C. 829–842.
81. Khoucha, F. A comparison of symmetrical and asymmetrical three-phase Hbridge multilevel inverter for DTC induction motor drives / F. Khoucha, M. S. Lagoun, A. Kheloui, M. E. H. Benbouzid // IEEE Transactions on Energy Conversion – 2011. – T. 26. – № 1. – C. 64–72.
82. Konstantinou, G. On re-examining symmetry of two-level selective harmonic elimination PWM: Novel formulations, solutions and performance evaluation / G. Konstantinou, V. G. Agelidis // Electric Power Systems Research – 2014. – T. 108. – C. 185–197.
83. Moeini, A. A DC link sensor-less voltage balancing technique for cascaded H-bridge multilevel converters with asymmetric selective harmonic current mitigation PWM / A. Moeini, S. Wang // IEEE Transactions on Power Electronics – 2018. – T. 33. – № 9. – C. 7571–7581.

84. Wanmin, F. A generalized formulation of quarter-wave symmetry SHE-PWM problems for multilevel inverters / F. Wanmin, R. Xinbo, W. Bin // *IEEE Transactions on Power Electronics* – 2009. – Т. 24. – № 7. – С. 1758–1766.
85. Wanmin, F. A generalized half-wave symmetry SHE-PWM formulation for multilevel voltage inverters / F. Wanmin, D. Xiaoli // *IEEE Transactions on Industrial Electronics* – 2010. – Т. 57. – № 9. – С. 3030–3038.
86. Yan, X. Multi-mode hybrid modulation strategy for three-level converters based on half-wave symmetric SHEPWM / X. Yan, B. Guan, X. Du // in *Proc. IEEE 12th Energy Conversion Congress & Exposition - Asia*. – 2021. – С. 349–354.
87. Радионов, А. А. Применение метода роя частиц для определения углов переключения в алгоритме широтно-импульсной модуляции с удалением выделенных гармоник / А. А. Радионов, А. С. Маклаков, Т. Цзин // *Электротехнические системы и комплексы*. – 2019. – № 1(42). – С. 38–44.
88. Sundareswaran, K. Inverter harmonic elimination through a colony of continuously exploring ants / K. Sundareswaran, K. Jayant, T. N. Shanavas // *IEEE Transactions on Industry Electronics* – 2007. – Т. 54. – № 5. – С. 2558–2565.
89. Ray, R. N. Harmonics elimination in a multilevel inverter using the particle swarm optimisation technique / R. N. Ray, D. Chatterjee, S. K. Goswami // *IET Power Electronics*. – 2009. – Т. 2. – № 6. – С. 646–652.
90. Memon, M. A. Asynchronous particle swarm optimization-genetic algorithm (APSO-GA) based selective harmonic elimination in a cascaded H-bridge multilevel inverter / M. A. Memon, M. D. Siddique, M. Saad, M. Mubin // *IEEE Transactions on Industrial Electronics* – 2021. – С. 1–1.
91. Lou, H. Pulse width modulation AC/DC converters with line current harmonics minimisation and high power factor using hybrid particle swarm optimization / H. Lou, C. Mao, J. Lu, D. Wang, W. J. Lee // *IET Power Electronics* – 2009. – Т. 2. – № 6. – С. 686–696.
92. Jing, T. Research on selective harmonic elimination technique based on particle swarm optimization / T. Jing, A. S. Maklakov, O. A. Gasiyarova // in *Proc. IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering*. – 2019. – С. 694–700.
93. Jiang, Y. Improved particle swarm optimization-based selective harmonic elimination and neutral point balance control for three-level inverter in LVRT operation / Y. Jiang, X. Li, C. Qin, X. Xing, Z. Chen // *IEEE Transactions on Industrial Informatics* – 2021. – Т. 18. – № 1. – С. 642–652



94. Bowes, S. R. Simple microprocessor implementation of new regular-sampled harmonic elimination PWM techniques / S. R. Bowes, P. R. Clark // IEEE Transactions on Industrial Applications. – 1992. – Т. 28. – № 1. – С. 89–95.
95. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014. – 19 с.
96. EN 50160-2011, Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems. – 2010.
97. Std. IEEE-519-2022, 1992, IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems. – 2022.
98. Глебов, Н. И. Методы оптимизации / Н. И. Глебов, Ю. А. Кочетов, А. В. Плясунов. – Новосибирск: Изд-во НГУ, 2000 г. – 105 с.
99. Николаев, А. А. Экспериментальные исследования электромагнитной совместимости современных электроприводов в системе электроснабжения промышленных предприятий / А. А. Николаев, Г. П. Корнилов, Т. Р. Храмшин, Г. Никифоров, Ф. Ф. Муталлапова // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2016. – Т. 14. – № 4. – С. 96-103.
100. Николаев, А. А. Исследование резонансных явлений в распределительных электрических сетях среднего напряжения систем внутризаводского электроснабжения промышленных предприятий / А. А. Николаев, Т. Р. Храмшин, М. Ю. Афанасьев // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2017. – Т. 5. – № 4. – С. 51-62.
101. Pontt, J. Resonance mitigation and dynamical behavior of systems with harmonic filters for improving reliability in mining plants / J. Pontt, J. Rodriguez, J. S. Martin, R. Aguilera, R. Bernal, P. Newman // Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting. – 2006. – С. 1298-1302.
102. Pontt, J. Resonances in a High-Power Active-Front-End Rectifier System / J. Pontt, G. Alzamora, R. Huerta, N. Becker // IEEE Trans. Ind. Electron. – 2005. – С. 482-488.
103. Буланов, М. В. Обеспечение электромагнитной совместимости мощных электроприводов с активными выпрямителями в системах электроснабжения при наличии резонансных явлений : специальность 05.09.03 "Электротехнические комплексы и системы" : автореферат диссертации на

соискание ученой степени кандидата технических наук / Буланов Михаил Викторович. – Магнитогорск, 2022. – 20 с.

104. Николаев, А. А. Разработка усовершенствованного алгоритма ШИМ активного выпрямителя с адаптацией к резонансным явлениям во внутривоздушной сети / А. А. Николаев, М. В. Буланов, А. М. Афанасьев, Д. А. Денисевич // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2018. – № 6. – С. 47-56.

105. Николаев, А. А. Разработка адаптивного алгоритма ШИМ активного выпрямителя и способа диагностики резонансных явлений во внутривоздушных сетях / А. А. Николаев, М. В. Буланов, К. А. Шахбиева // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2020. – № 4. – С. 44-54.

106. Nikolaev, A. A. Development of improved PWM algorithm of active rectifier with function of resonant phenomena adaptation in electrical networks of medium voltage / A. A. Nikolaev, M. V. Bulanov, K. A. Shakhbieva // Proceedings – 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2020, Sochi, 18–22 мая 2020 года. – Sochi: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. – С. 1-6.

107. Portillo, R. Improved hybrid SHM-SHE modulation technique for four-leg three-level NPC inverters / R. Portillo, M. Sharifzadeh, H. Vahedi, L. G. Franquelo, K. Al-Haddad // in Proc. IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. – 2015. – С. 5415–5420. – DOI: 10.1109/IECON.2015.7392952.

108. Sharifzadeh, M. Hybrid SHM–SHE modulation technique for a four-leg NPC inverter with DC capacitor self-voltage balancing / M. Sharifzadeh, H. Vahedi, A. Sheikholeslami, P. Labbé, K. Al-Haddad // IEEE Transactions on Industrial Electronics – 2015. – Т. 62. – № 8. – С. 4890–4899.

109. Zhang, Y. A hybrid PWM applied to high-power three-level inverter-fed induction-motor drives / Y. Zhang, Z. Zhao, J. Zhu // IEEE Transactions on Industrial Electronics – 2011. – Т. 58. – № 8. – С. 3409–3420.

110. Zhang, Y. Hybrid PWM Scheme for the Grid Inverter / Y. Zhang, D. Xu, C. Yan, S. Zou // IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics – 2015. – Т. 3. – № 4. – С. 1151–1159.

111. Jing, T. Research of a flexible space-vector-based hybrid PWM transition algorithm between SHEPWM and SHMPWM for three-level NPC inverters / T. Jing, A. S. Maklakov, A. A. Radionov, V. R. Gasiyarov // Machines – 2020. – Т. 8. – № 3. – С. 57.

112. Cheng, J. Dynamic and steady state response analysis of selective harmonic elimination in high power inverters / J. Cheng, T. Xu, D. Chen, G. Chen // IEEE Access – 2021. – N. 9. – С. 75588–75598.
113. Маклаков, А.С. Математическое описание трехуровневого преобразователя частоты с фиксированной нейтралью на базе активного выпрямителя и автономного инвертора напряжения / А. С. Маклаков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2016. – Т. 16. – № 4. – С. 49–59.
114. Chimonyo, K. B. Design and Analysis of Electrical Drives Using Active Front End Converter / K. B. Chimonyo, K. Sathish Kumar, B. Kishore Kumar, K. Ravi // 2018 Second International Conference on Inventive Communication and Computational Technologies (ICICCT). – Coimbatore, India, 2018. – С. 115-119.
115. Chengwu, L. Research on AFE technology in multi-inverter system / L. Chengwu, B. Dong // in Proc. 5th International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. – 2013. – С. 875–878.
116. Гасияров, В. Р. Моделирование трехуровневого преобразователя частоты с фиксированной нейтралью при алгоритме ШИМ с удалением выделенных гармоник / В. Р. Гасияров, А. А. Радионов, А. С. Маклаков // Электротехнические системы и комплексы. – 2017. – № 1(34). – С. 4–9.
117. Ahmadi, D. Online selective harmonic compensation and power generation with distributed energy resources / D. Ahmadi, J. Wang // IEEE Transactions on Power Electronics – 2014. – Т. 29. – № 7. – С. 3738–3746.
118. Hoevenaars, A. Active Harmonic Mitigation: What the Manufacturers Don't Tell You / A. Hoevenaars, M. Farbis, M. McGraw // IEEE Industry Applications Magazine – 2020. – Т. 26. – № 5. – С. 41–51.
119. 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. Ivekeev // 2022 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). – Магнитогорск, 2022. – С. 373-377. – DOI: 10.1109/UralCon54942.2022.9906673.
120. Nikolaev, A. A. Experimental Studies of Power Quality in the 34.5 kV Network of MMK 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.

121. Nikolaev, A. A. Influence Investigation of Electric Drive Operation Mode at a Rolling Mill FC with AR on the 10kV Supply Network Voltage Quality / A. A. Nikolaev, I. G. Gilemov, M. V. Bulanov // 2021 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), Магнитогорск, Россия. – IEEE, 2021. – С. 535-540.

122. 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.

123. 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.

124. Николаев, А. А. Особенности усовершенствованной системы управления активным выпрямителем преобразователя частоты с изменяемой частотой коммутации силовых ключей / А. А. Николаев, И. Г. Гилемов // Энергетика будущего - цифровая трансформация : Сборник трудов II всероссийской научно-практической конференции, Липецк, 15–16 декабря 2021 года. – Липецк: Липецкий государственный технический университет, 2021. – С. 42-48.

125. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022660730. Программа для анализа режимов работы блока ШИМ активного выпрямителя с функцией изменения частоты коммутации силовых ключей / А. А. Николаев, И. Г. Гилемов; № 2022619565: заявл. 27.05.2022: опубл. 08.06.2022. 32,1 Кб.

126. Черных, В.И. Моделирование электротехнических устройств в Matlab SimPowerSystem и Simulink: учеб. / В.И. Черных. – М.: ДМК Пресс, – 2007. – 288 с.

127. Идельчик, В. И. Электрические системы и сети: учеб. для вузов / В. И. Идельчик. – Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 592 с.

128. Ключев, В.И. Теория электропривода: Учебник для вузов / В.И. Ключев - М.: Энергоатомиздат. – 2001. – 697 с.

129. Корнилов, Г.П. Моделирование электротехнических комплексов металлургических предприятий: учеб. пособие. / Г. П. Корнилов, А. А. Николаев, Т. Р. Храмшин, А. А. Мурзинов. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та. им. Г.И. Носова. – 2012. – 235 с.

130. Holmes, D.G. Pulse width modulation for power converters: principles and practice / D.G. Holmes, T.A. Lipo. – 1st ed. New Jersey: Wiley-IEEE Press, 2003. – 744 с.

131. 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.

132. 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.

133. Nikolaev, A. A. Development of a Comprehensive Simulation Model of the Power Supply and Drive System Based on AFE-FC for Power Quality Research / A. A. Nikolaev, M. V. Bulanov, I. G. Gilemov, S. A. Linkov // 2022 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Сочи, Россия. – IEEE, 2022. – С. 896-901.

134. Lisovskaya, T.A. Linearization small deviation model of active front end rectifier / T. A. Lisovskaya, A. S. Maklakov, R. A. Lisovsky, T. Jing // in Proc. Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice. – 2020. – С. 133–136.

135. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022617268. Программа для расчёта значений углов переключения силовых ключей активных выпрямителей по методу ШИМ с удалением выделенных гармоник / А. А. Николаев, И. Г. Гилемов, М. В. Буланов; № 2022616667; заявл. 18.04.2022; опубл. 19.04.2022. 2,3 Кб.

136. Николаев, А. А. Разработка научно обоснованных технических решений по обеспечению электромагнитной совместимости мощных промышленных электроприводов с питающей сетью : монография / А. А. Николаев, М. В. Буланов, И. Г. Гилемов, М. Ю. Афанасьев, К. А. Шахбиева, В. А. Лаптова – Магнитогорск : Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2021. – 301 с.

137. Николаев, А. А. Обеспечение эффективного функционирования мощных промышленных электроприводов на базе преобразователей частоты с активными

выпрямителями : монография / А. А. Николаев, М. В. Буланов, И. Г. Гилемов [и др.]. – Магнитогорск : Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2022. – 396 с.

138. 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.

139. 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.

140. Николаев, А. А. Исследование динамических режимов работы системы управления активного выпрямителя с функцией выбора таблиц углов переключения IGCT-тиристоры / А. А. Николаев, И. Г. Гилемов, М. В. Буланов // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – 2022. – Т. 13, – № 1. – С. 54-59.

141. "Integrated gate-commutated thyristors (IGCT) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.hitachienergy.com/products-and-solutions/semiconductors/integrated-gate-commutated-thyristors-igct/asymmetric-and-reverse-conducting>.

142. 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.



## ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица П.А.1 - Параметры главных электроприводов стана горячей прокатки 1750 ЗАО «ММК Metalurji»

Наименование электропривода	Модель ПЧ-АВ	Мощность СД, Р <sub>д.н.</sub> , МВт	Параметры ПЧ-АВ			
			Схема питания	Параметры АВ: $S_{AB.n}$ , МВА / $U_{AB.n}$ , В / $I_{AB.n}$ , А	Параметры АИН: $S_{AIIH.n}$ , МВА / $U_{AIIH.n}$ , В / $I_{AIIH.n}$ , А	Алгоритм ШИМ
ЭП черновой клетки №1	ABB ACS 6207_A12_2 s7_1V2_C38_W3	6,6	12-пульсная от двух тр-ров	9,3 МВА; 3160 В; 2×850 А	9,3 МВА; 3300 В; 2×860 А	ШИМ с УВГ с 5 переключ. за ¼ п.
ЭП черновой клетки №2	ABB ACS 6207_A12_2 s7_1V2_C38_W3	7,8	12-пульсная от двух тр-ров	9,3 МВА; 3160 В; 2×850 А	9,3 МВА; 3300 В; 2×860 А	ШИМ с УВГ с 5 переключ. за ¼ п.
ЭП чистовой клетки №1	ABB ACS 6209_A12_2 s9_1V2_C26_C24_W3	9,5	12-пульсная от двух тр-ров	12,0 МВА; 3160 В; 2×1100 А	12,0 МВА; 3300 В; 2×1100 А	ШИМ с УВГ с 5 переключ. за ¼ п.
ЭП чистовой клетки №2	ABB ACS 6209_A12_2 s9_1V2_C26_C24_W3	9,5	12-пульсная от двух тр-ров	12,0 МВА; 3160 В; 2×1100 А	12,0 МВА; 3300 В; 2×1100 А	ШИМ с УВГ с 5 переключ. за ¼ п.
ЭП чистовой клетки №3	ABB ACS 6209_A12_2 s9_1V2_C26_C24_W3	8,5	12-пульсная от двух тр-ров	12,0 МВА; 3160 В; 2×1100 А	12,0 МВА; 3300 В; 2×1100 А	ШИМ с УВГ с 5 переключ. за ¼ п.
ЭП чистовой клетки №4	ABB ACS 6209_A12_2 s9_1V2_C26_C24_W3	8,5	12-пульсная от двух тр-ров	12,0 МВА; 3160 В; 2×1100 А	12,0 МВА; 3300 В; 2×1100 А	ШИМ с УВГ с 5 переключ. за ¼ п.

Таблица П.А.2 - Параметры электроприводов моталок стана горячей прокатки 1750 ЗАО «ММК Metalurji»

Наименование электропривода	Выпрямитель	Инвертор	Параметры асинхронного двигателя	
ЭП верхнего подающего ролика перед моталкой №1	Тиристорный выпрямитель, 6-пульсный, две группы; $I_H = 4400$ А; GR93.E.G45.3 0.DT.28	$2 \times R8i$ $I_H = 713$ А; ACS800-104-1160-7+E205+Q950+V991	$P_H = 350$ кВт; $U_H = 530$ В; $I_H = 461$ А; $n_H = 244$ об/мин	
ЭП нижнего подающего ролика перед моталкой №1		$2 \times R8i$ $I_H = 713$ А; ACS800-104-1160-7+E205+Q950+V991	$P_H = 350$ кВт; $U_H = 530$ В; $I_H = 461$ А; $n_H = 244$ об/мин	
ЭП моталки №1		$4 \times R8i$ $I_H = 1396$ А; ACS800-104-2320-7+E205+Q950+V991	$P_H = 700$ кВт; $U_H = 540$ В; $I_H = 970$ А; $n_H = 265$ об/мин	
ЭП упаковки рулонов №1		$R8i$ $I_H = 336$ А; ACS800-104-0400-7+E205+Q950+V991	$P_H = 115$ кВт; $U_H = 690$ В; $I_H = 119,3$ А; $n_H = 986$ об/мин	
		$R8i$ $I_H = 336$ А; ACS800-104-0400-7+E205+Q950+V991	$P_H = 115$ кВт; $U_H = 690$ В; $I_H = 119,3$ А; $n_H = 986$ об/мин	
		$R8i$ $I_H = 336$ А; ACS800-104-0400-7+E205+Q950+V991	$P_H = 115$ кВт; $U_H = 690$ В; $I_H = 119,3$ А; $n_H = 986$ об/мин	
ЭП верхнего подающего ролика перед моталкой №2		Тиристорный выпрямитель, 6-пульсный, две группы; $I_H = 4400$ А; GR93.E.G45.3 0.DT.28	$2 \times R8i$ $I_H = 713$ А; ACS800-104-1160-7+E205+Q950+V991	$P_H = 350$ кВт; $U_H = 530$ В; $I_H = 461$ А; $n_H = 244$ об/мин
ЭП нижнего подающего ролика перед моталкой №2			$2 \times R8i$ $I_H = 713$ А; ACS800-104-1160-7+E205+Q950+V991	$P_H = 350$ кВт; $U_H = 530$ В; $I_H = 461$ А; $n_H = 244$ об/мин
ЭП моталки №2			$4 \times R8i$ $I_H = 1396$ А; ACS800-104-2320-7+E205+Q950+V991	$P_H = 700$ кВт; $U_H = 540$ В; $I_H = 970$ А; $n_H = 265$ об/мин
ЭП упаковки рулонов №2			$R8i$ $I_H = 336$ А; ACS800-104-0400-7+E205+Q950+V991	$P_H = 115$ кВт; $U_H = 690$ В; $I_H = 119,3$ А; $n_H = 986$ об/мин
	$R8i$ $I_H = 336$ А; ACS800-104-0400-7+E205+Q950+V991		$P_H = 115$ кВт; $U_H = 690$ В; $I_H = 119,3$ А; $n_H = 986$ об/мин	
	$R8i$ $I_H = 336$ А; ACS800-104-0400-7+E205+Q950+V991		$P_H = 115$ кВт; $U_H = 690$ В; $I_H = 119,3$ А; $n_H = 986$ об/мин	

Таблица П.А.3 - Параметры питающих ПЧ-АВ ACS6000 трансформаторов главных электроприводов стана горячей прокатки 1750 ЗАО «ММК Metalurji»

Наименование электропривода	Схема и группа соедин.	Мощность $S_H$ , кВА	Напряжение $U_{1Л.н}$ , В; ток $I_{1.н}$ , А	Напряжение $U_{2Л.н}$ , В; ток $I_{2.н}$ , А	Напряжение КЗ $U_{КЗ}$ , %	Потери $P_{КЗ}$ , кВт
ЭП черновой клетки №1	III/Y <sub>0</sub>	4100	17250 В; 137,2 А	3160 В; 749,1 А	7,95	37
	Y/D11	4100	17250 В; 137,2 А	3160 В; 749,1 А	8,06	41
ЭП черновой клетки №2	III/Y <sub>0</sub>	4800	17250 В; 160,7 А	3160 В; 877,0 А	7,97	41
	Y/D11	4800	17250 В; 160,7 А	3160 В; 877,0 А	8,08	41
ЭП чистовой клетки №1	III/Y <sub>0</sub>	5800	17250 В; 194,1 А	3160 В; 1059,7 А	9,81	54
	Y/D11	5800	17250 В; 194,1 А	3160 В; 1059,7 А	9,81	54
ЭП чистовой клетки №2	III/Y <sub>0</sub>	5800	17250 В; 194,1 А	3160 В; 1059,7 А	9,86	54
	Y/D11	5800	17250 В; 194,1 А	3160 В; 1059,7 А	9,78	54
ЭП чистовой клетки №3	III/Y <sub>0</sub>	5200	17250 В; 174,0 А	3160 В; 950,1 А	8,92	47
	Y/D11	5200	17250 В; 174,0 А	3160 В; 950,1 А	8,9	47
ЭП чистовой клетки №4	III/Y <sub>0</sub>	5200	17250 В; 174,0 А	3160 В; 950,1 А	8,85	47
	Y/D11	5200	17250 В; 174,0 А	3160 В; 950,1 А	8,94	47

Таблица П.А.4 - Параметры трансформаторов, питающих групповые электропривода моталок на базе преобразователей ACS800 стана горячей прокатки 1750 ЗАО «ММК Metalurji»

Наименование электропривода	Схема и группа соедин.	Мощность $S_H$ , кВА	Напряжение $U_{1Л.н}$ , В	Напряжение $U_{2Л.н}$ , В	Напряжение КЗ $U_{КЗ}$ , %
ЭП моталки №1	D/Y <sub>11</sub>	2500	34500	750	6,5
ЭП моталки №2	D/D <sub>0</sub>	2500	34500	750	6,5

Таблица П.А.5 - Параметры трансформаторов возбудителей ПЧ ACS6000 главных электроприводов стана горячей прокатки 1750 ЗАО «ММК Metalurji»

Наименование электропривода	Схема и группа соедин.	Первичная обмотка: мощность $S_{1,н}$ , кВА / Напряжение $U_{1,л,н}$ , В; ток $I_{1,н}$ , А	Вторичная обмотка 1: мощность $S_{2,н}$ , кВА / Напряжение $U_{2,л,н}$ , В; ток $I_{2,н}$ , А	Вторичная обмотка 2: мощность $S_{3,н}$ , кВА / Напряжение $U_{3,л,н}$ , В; ток $I_{3,н}$ , А	Напряже ние КЗ $U_{КЗ}$ , %	Потери $P_{КЗ}$ , кВт
ЭП черновых клетей №№1,2	D/d0/d0	700 кВА; 34500 В; 11,7 А	350 кВА; 400 В; 505,2 А	350 кВА; 400 В; 505,2 А	6,29 6,20	7,12
ЭП чистовых клетей №№1,2	D/d0/d0	700 кВА; 34500 В; 11,7 А	350 кВА; 400 В; 505,2 А	350 кВА; 400 В; 505,2 А	6,26 6,16	7,12
ЭП чистовых клетей №№3,4	D/d0/d0	700 кВА; 34500 В; 11,7 А	350 кВА; 400 В; 505,2 А	350 кВА; 400 В; 505,2 А	6,23 6,14	7,16

Таблица П.А.6 - Параметры синхронных электродвигателей главных электроприводов стана горячей прокатки 1750 ЗАО «ММК Metalurji»

Наименование электропривода и модель двигателя	Мощность $P_{д}$ , кВт	Статор		Частота вращения $n_{д,н}$ , об/мин / $n_{д,макс}$ , об/мин	Ротор Напряжение $U_{f,н}$ , В / ток $I_{f,н}$ , А при $f_{д,н}$ , и $f_{д,макс}$	Момент, М, кНм при $f_{д,н}$ , и $f_{д,макс}$
		Напряжение $U_{д,н}$ , В / ток $I_{д,н}$ , А	Частота $f_{д,н}$ , Гц / $f_{д,макс}$ , Гц			
ЭП черн. клетки №1 / AMZ 1250ZA12 LSB	6600	3150 В; 1243 А	11,0; 17,0	111; 170	186 В, 516 А; 164 В, 454 А	570; 371
ЭП черн. клетки №2 / AMZ 1250ZA12 LSB	7800	3065 В; 1504 А	13,0; 30,0	130; 300	187 В, 516 А; 153 В, 424 А	573; 248
ЭП чист. клетки №1 / AMZ 1250UU12 LSB	9500	3045 В; 1832 А	22,0; 56,0	220; 560	144 В, 518 А; 116 В, 416 А	412; 162
ЭП чист. клетки №2 / AMZ 1250UU12 LSB	9500	3045 В; 1832 А	22,0; 56,0	220; 560	144 В, 518 А; 116 В, 416 А	412; 162
ЭП чист. клетки №3 / AMZ 1250UU12 LSB	8500	3035 В; 1645 А	22,0; 57,0	220; 570	182 В, 334 А; 149 В, 272 А	369; 142
ЭП чист. клетки №4 / AMZ 1250UU12 LSB	8500	3035 В; 1645 А	22,0; 57,0	220; 570	182 В, 334 А; 149 В, 272 А	369; 142

Таблица П.А.7 - Технические параметры сетевых трансформаторов ЗАО «ММК Metalurji»

Параметр	Значение
1. Модель трансформатора	1ZTR280200
2. Номинальная мощность $S_n$ , МВА	125 (ONAN) 155 (ONAF)
3. Номинальное напряжение первичной обмотки $U_1$ , кВ	380
4. Номинальное напряжение вторичной обмотки $U_2$ , кВ	34,5
5. Схема и группа соединения обмоток	$Y_N/d_{11}$
6. Номинальный ток первичной обмотки $I_1$ , А	189,9 (ONAN) 235,5 (ONAF) (211,0 – 172,7 – ONAN) (261,7 – 214,1 – ONAF)
7. Номинальный ток вторичной обмотки $I_2$ , А	2091,8 (ONAN) 2593,9 (ONAF)
8. Количество ступеней РПН	17
9. Напряжение КЗ для 1, 9, 17 ступеней РПН $U_{КЗ}$ , %	18,2; 18,21; 18,85
10. Потери КЗ $P_{КЗ}$ , кВт	507,5
11. Потери холостого хода $P_0$ , кВт	75

Примечание. Режимы охлаждения трансформатора обозначены согласно ANSI / IEE C57.12.00: ONAN – естественное масляное охлаждение, ONAF – охлаждение с естественной циркуляцией масла и обдувом.

Таблица П.А.8 - Технические параметры кабельных линий 35 кВ питающих распределительную подстанцию 132EDM ЗАО «ММК Metalurji»

Начало линии	Конец линии	Марка КЛ	Длина, м	Сечение 1 фазы, мм <sup>2</sup>	$R_{\Sigma 20^{\circ}C}$ , Ом	$L_{\Sigma}$ , мГн	$C_{\Sigma}$ , мкФ
51EDM секция D ячейка Н13	132EDM секция 1 ячейка Н08	PRYSMYAN YE3SV-20.3/35kV	685	2×300	0,021	0,125	0,312
51EDM секция D ячейка Н12	132EDM секция 2 ячейка Н13	PRYSMYAN YE3SV-20.3/35kV	707	2×300	0,021	0,129	0,322

Таблица П.А.9 - Технические параметры кабельных линий 35 кВ, отходящих от распределительной подстанции 132EDM ЗАО «ММК Metalurji»

Секция	Ячейка	Потребитель	Марка КЛ	Длина, м	Сечение 1 фазы, мм <sup>2</sup>	$R_{\Sigma 20^{\circ}C}$ , Ом	$L_{\Sigma}$ , мГн	$C_{\Sigma}$ , мкФ
1	H02	Тр-ры ЭП черновой клетки №1	PRYSMYAN YE3SV-20.3/35kV	45	1×300	0,0027	0,0164	0,0103
	H03	Тр-ры ЭП черновой клетки №2	PRYSMYAN YE3SV-20.3/35kV	41	1×300	0,0025	0,015	0,0094
	H04	Тр-ры возб-лей СД черн. клетей №№1,2	PRYSMYAN YE3SV-20.3/35kV	22	1×150	0,0027	0,0089	0,0038
	H05	Тр-ры ЭП чистой клетки №1	PRYSMYAN YE3SV-20.3/35kV	28	1×300	0,0017	0,0102	0,0064
	H06	Тр-ры ЭП чистой клетки №2	PRYSMYAN YE3SV-20.3/35kV	42	1×300	0,0025	0,0153	0,0096
	H07	Тр-ры возб-лей СД черн. клетей №№1,2	PRYSMYAN YE3SV-20.3/35kV	25	1×150	0,0031	0,0101	0,0043
	2	H14	Тр-ры ЭП чистой клетки №3	PRYSMYAN YE3SV-20.3/35kV	26	1×300	0,0016	0,0095
H15		Тр-ры ЭП чистой клетки №4	PRYSMYAN YE3SV-20.3/35kV	32	1×300	0,0019	0,0117	0,0073
H16		Тр-ры возб-лей СД черн. клетей №№3,4	PRYSMYAN YE3SV-20.3/35kV	22	1×150	0,0027	0,0089	0,0038

Примечание: кабель YE3SV является аналогом ПвВнг(А)-LS российских производителей.



Таблица П.А.10 - Технические параметры кабельных линий главных электроприводов стана горячей прокатки 1750 ЗАО «ММК Metalurji»

Электропривод	Начало линии	Конец линии	Марка КЛ	Длина, м	Сечение 1 фазы, мм <sup>2</sup>	$R_{\Sigma 20^{\circ}C}$ , Ом	$L_{\Sigma}$ , мГн	$C_{\Sigma}$ , мкФ
Черн. клеть №1	Тр-тор Т1	АВ1	PRYSMYAN 2XS2Y2YFG2Y- 6/10kV	38	4×240	0,0007	0,0018	0,0711
	Тр-тор Т2	АВ2	PRYSMYAN 2XS2Y2YFG2Y- 6/10kV	43	4×240	0,0008	0,002	0,0805
	АИН1,2	СД	PRYSMYAN 2XS2Y2YFG2Y- 6/10kV	30	8×240	0,0003	0,0007	0,1123
	Тр-тор возбуд.	ТВ	PRYSMYAN YVMV-0.6/1kV	24	2×240	0,0009	0,0023	0,0225
	ТВ	ОВ СД	PRYSMYAN YVMV-0.6/1kV	29	2×240	0,0011	0,0027	0,0271
Черн. клеть №2	Тр-тор Т1	АВ1	PRYSMYAN 2XS2Y2YFG2Y- 6/10kV	48	4×240	0,0009	0,0023	0,0899
	Тр-тор Т2	АВ2	PRYSMYAN 2XS2Y2YFG2Y- 6/10kV	53	4×240	0,001	0,0025	0,0992
	АИН1,2	СД	PRYSMYAN 2XS2Y2YFG2Y- 6/10kV	42	8×240	0,0004	0,001	0,1572
	Тр-тор возбуд.	ТВ	PRYSMYAN YVMV-0.6/1kV	37	2×240	0,0014	0,0035	0,0346
	ТВ	ОВ СД	PRYSMYAN YVMV-0.6/1kV	42	2×240	0,0016	0,0040	0,0393
Чист. клеть №1	Тр-тор Т1	АВ1	PRYSMYAN 2XS2Y2YFG2Y- 6/10kV	50	4×240	0,0009	0,0023	0,0936
	Тр-тор Т2	АВ2	PRYSMYAN 2XS2Y2YFG2Y- 6/10kV	55	4×240	0,0010	0,0026	0,103
	АИН1,2	СД	PRYSMYAN 2XS2Y2YFG2Y- 6/10kV	56	8×240	0,0005	0,0013	0,2097
	Тр-тор возбуд.	ТВ	PRYSMYAN YVMV-0.6/1kV	25	2×240	0,0009	0,0024	0,0234
	ТВ	ОВ СД	PRYSMYAN YVMV-0.6/1kV	42	2×240	0,0016	0,004	0,0393

## Продолжение таблицы П.А.10

Электро-привод	Начало линии	Конец линии	Марка КЛ	Длина, м	Сечение 1 фазы, мм <sup>2</sup>	$R_{\Sigma 20^{\circ}\text{C}}$ , Ом	$L_{\Sigma}$ , мГн	$C_{\Sigma}$ , мкФ
Чист. клеть №2	Тр-тор Т1	АВ1	PRYSMYAN 2XS2Y2YFG2Y- 6/10kV	57	4×240	0,0011	0,0027	0,1067
	Тр-тор Т2	АВ2	PRYSMYAN 2XS2Y2YFG2Y- 6/10kV	62	4×240	0,0012	0,0029	0,1161
	АИН1,2	СД	PRYSMYAN 2XS2Y2YFG2Y- 6/10kV	68	8×240	0,0006	0,0016	0,2546
	Тр-тор возбуд.	ТВ	PRYSMYAN YVMV-0.6/1kV	42	2×240	0,0016	0,0040	0,0393
	ТВ	ОВ СД	PRYSMYAN YVMV-0.6/1kV	57	2×240	0,0021	0,0054	0,0534
Чист. клеть №3	Тр-тор Т1	АВ1	PRYSMYAN 2XS2Y2YFG2Y- 6/10kV	57	4×240	0,0011	0,0027	0,1067
	Тр-тор Т2	АВ2	PRYSMYAN 2XS2Y2YFG2Y- 6/10kV	62	4×240	0,0012	0,0029	0,1161
	АИН1,2	СД	PRYSMYAN 2XS2Y2YFG2Y- 6/10kV	50	8×240	0,0005	0,0012	0,1872
	Тр-тор возбуд.	ТВ	PRYSMYAN YVMV-0.6/1kV	38	2×240	0,0014	0,0036	0,0356
	ТВ	ОВ СД	PRYSMYAN YVMV-0.6/1kV	54	2×240	0,0020	0,0051	0,0505
Чист. клеть №4	Тр-тор Т1	АВ1	PRYSMYAN 2XS2Y2YFG2Y- 6/10kV	59	4×240	0,0011	0,0028	0,1105
	Тр-тор Т2	АВ2	PRYSMYAN 2XS2Y2YFG2Y- 6/10kV	64	4×240	0,0012	0,0030	0,1198
	АИН1,2	СД	PRYSMYAN 2XS2Y2YFG2Y- 6/10kV	52	8×240	0,0005	0,0012	0,1947
	Тр-тор возбуд.	ТВ	PRYSMYAN YVMV-0.6/1kV	33	2×240	0,0012	0,0031	0,0309
	ТВ	ОВ СД	PRYSMYAN YVMV-0.6/1kV	51	2×240	0,0019	0,0048	0,0477

Примечание: кабели 2XS2Y и YVMV являются аналогами ПвВнг(А)-LS российских производителей.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Таблица П.Б.1 - Параметры главных электроприводов клеток стана холодной прокатки ЧерМК ПАО «Северсталь»

Наименование электропривода	Модель ПЧ-АВ	Мощность СД, $P_{Д.н}$ , МВт	Параметры ПЧ-АВ			
			Схема питания	Параметры АВ: $S_{АВ.н}$ , МВА / $U_{АВ.н}$ , В / $I_{АВ.н}$ , А	Параметры АИН: $S_{АИН.н}$ , МВА / $U_{АИН.н}$ , В / $I_{АИН.н}$ , А	Алгоритм ШИМ
ЭП клетки №1	ABB ACS 6113_A06_2 s7_1V2_C39_W3a	12,0	6-пульсная от одного тр-ра	14 МВА; 3160 В; 2190 А	14 МВА; 3300 В; 2×1280 А	ШИМ с УВГ с 3 переключ. за 1/4 п.
ЭП клетки №2	ABB ACS 6207_A12_2 s7_1V2_C39_W3	12,0	12-пульсная от трёхобмот. тр-ра	14 МВА; 3160 В; 2×959,1 А	14 МВА; 3150 В; 2×933,1 А	ШИМ с УВГ с 7 переключ. за 1/4 п.
ЭП клетки №3	ABB ACS 6207_A12_2 s7_1V2_C39_W3	12,0	12-пульсная от трёхобмот. тр-ра	14 МВА; 3160 В; 2×959,1 А	14 МВА; 3150 В; 2×933,1 А	ШИМ с УВГ с 7 переключ. за 1/4 п.
ЭП клетки №4	ABB ACS 6209_A12_2 s9_1V2_C26_C24_W3	9,5	12-пульсная от двух тр-ров	14 МВА; 3160 В; 2×959,1 А	14 МВА; 3150 В; 2×933,1 А	ШИМ с УВГ с 7 переключ. за 1/4 п.
ЭП натяжной моталки	ABB ACS 6207_A06_1 s7_1V1_C25_W2	4,8	6-пульсная от одного тр-ра	7,0 МВА; 3160 В; 834 А	7,0 МВА; 3050 В; 779 А	ШИМ с УВГ с 9 переключ. за 1/4 п.

Таблица П.Б.2 - Параметры питающих ПЧ-АВ ACS6000 трансформаторов главных электроприводов стана холодной прокатки ЧерМК ПАО «Северсталь»

Наименование электропривода	Схема и группа соедин.	Мощность $S_H$ , МВА	Напряжение $U_{1Л.н}$ , кВ; ток $I_{1.н}$ , А	Напряжение $U_{2Л.н}$ , В; ток $I_{2.н}$ , А	Напряжение КЗ $U_{КЗ}$ , %
ЭП клетки №1	Y/Y-0	12	10 кВ; 692,8 А	3165 В; 2189 А	20,2
ЭП клетки №2	$\Delta/Y_{11}/\Delta 0$	12	10 кВ; 638,0 А	3157/3153 В 1097/1099 А	12,7
ЭП клетки №3	$\Delta/Y_{11}/\Delta 0$	12	10 кВ; 638,0 А	3157/3153 В 1097/1099 А	12,7
ЭП клетки №4	$\Delta/Y_{11}/\Delta 0$	12	10 кВ; 638,0 А	3157/3153 В 1097/1099 А	12,7
ЭП натяжной моталки	Y <sub>н</sub> /Y <sub>н</sub> -0	4,804	10 кВ; 277,4 А	3169 В; 875,2 А	12,97

Таблица П.Б.3 - Технические параметры сетевых трансформаторов 1Т и 2Т 110/10 кВ ГПП-2 ЧерМК ПАО «Северсталь»

Параметр	Значение
1. Модель трансформатора	ТДН-63000/110-У1
2. Номинальная мощность $S_n$ , МВА	63,0
3. Номинальное напряжение первичной обмотки $U_1$ , кВ	115 (133,4 – 96,6)
4. Номинальное напряжение вторичной обмотки $U_2$ , кВ	10,5
5. Схема и группа соединения обмоток	Y <sub>н</sub> / $\Delta_{11}$
6. Номинальный ток первичной обмотки $I_1$ , А	316,3 (272,6 – 334,1)
7. Номинальный ток вторичной обмотки $I_2$ , А	3464,1
8. Количество ступеней РПН	19
9. Напряжение КЗ для 1, 10, 19 ступеней РПН $U_{КЗ}$ , %	10,8; 10,1; 9,97
10. Потери КЗ для 1, 10, 19 ступеней РПН $P_{КЗ}$ , кВт	210,65; 212,32; 234,44
11. Потери холостого хода $P_0$ , кВт	29,4

Таблица П.Б.4 - Технические параметры токоограничивающих реакторов, применяемых в фидерах ЗРУ-10 кВ ГПП-2

Номер секции ГПП-2	Номер фидера ГПП-2	Тип реактора	Технические данные реакторов					
			$U_{л.ном},$ кВ	$I_{ном},$ А	$\Delta P_{фаз},$ кВт	$X_{фаз},$ Ом	$L_{фаз},$ мГн	$R_{фаз},$ Ом
Секция 2	1	РТСТ-10-2000-0,35 УЗ	10,0	2000	13,2	0,35	1,114	0,003
	3	РБА 10-1500-8		1500	10,4	0,31	0,98	0,005
	5	РБА 10-1000-6		1000	6,9	0,34	1,103	0,006
	6А	РБА 10-1500-8		1500	10,4	0,31	0,98	0,005
	7	РБА 10-1000-6		1000	6,9	0,34	1,103	0,006
	8	РБА 10-1000-6		1000	6,9	0,34	1,103	0,006
	9	РБА 10-1000-6		1000	6,9	0,34	1,103	0,006
	10	РБА 10-1000-6		1000	6,9	0,34	1,103	0,006
	11	РБА 10-600-3		600	4,2	0,29	0,919	0,012
Секция 1	15	РБА 10-1000-6		1000	6,9	0,34	1,103	0,006
	16	РБА 10-1000-6		1000	6,9	0,34	1,103	0,006
	17	РБА 10-1000-6		1000	6,9	0,34	1,103	0,006
	18	РБА 10-1000-6		1000	6,9	0,34	1,103	0,006
	20	РБА 10-1000-6		1000	6,9	0,34	1,103	0,006
	21	РТСТ-10-2000-0,35 УЗ		2000	13,2	0,35	1,114	0,003
	23	РБА 10-1000-6		1000	6,9	0,34	1,103	0,006
	25	РБА 10-1000-6		1000	6,9	0,34	1,103	0,006
	26	РБА 10-1000-6		1000	6,9	0,34	1,103	0,006
27	РБА 10-1000-6	1000	6,9	0,34	1,103	0,006		

Таблица П.Б.5 – Параметры кабельных линий фидеров РУ-10 кВ ГПП-2, питающих цеховые распределительные подстанции

Секция	Трасса (конец)	Марка ВЛ/КЛ	Сечение ВЛ/КЛ	Кол- во	Длина, м	Фидер	$R_0$ , Ом/км	$L_0$ , мГн/км	$C_{уд}$ , мкФ/км	$C_x$ , мкФ
1	РП-92 РУ 10кВ (последов. включение КЛ с разными марками)	ЦААШВу-10	3x185	3	400	15А,Б	0,211	0,262	0,32	0,384
		ААШВ-10	3x185	3	200		0,211	0,262	0,32	0,192
	КТП 1 РТП-54а Тр-тор №2 1000 кВА	ААШВу-10	3x95	1	910	16А	0,411	0,294	0,23	0,209
	РТП-54а Тр-тор №1 6300 кВА	ААШВу-10	3x150	2	840	16Б	0,265	0,27	0,29	0,4872
	РП-220 РУ 10кВ (последов. включение КЛ с разными марками)	ААШВу-10	3x185	4	400	17	0,211	0,262	0,32	0,512
		ЦААШВу-10	3x185	4	740		0,211	0,262	0,32	0,947
	РП-155 РУ 10кВ	АПВнг(В)- LS	3x240	2	700	18А,Б	0,161	0,254	0,429	0,6006
	Тр-тор № 1 630кВА	ЦААШнг-10	3x95	1	155	20А	0,411	0,294	0,23	0,0357
	РП-19 РУ 10кВ (параллельное включение КЛ с разными марками )	ЦААШВу-10	3x240	6	220	21	0,161	0,254	0,36	0,475
		ПвВнг(А)- LS	3x150	1	370		0,159	0,27	0,357	0,132
	ПС-13 РУ 10кВ	ЦААШВу-10	3x185	6	200	23	0,211	0,262	0,32	0,384
	РП-103 РУ 10кВ	ЦААШВу-10	3x185	3	600	25А	0,211	0,262	0,32	0,576
	ПС-56 РУ 10кВ	ЦААШВу-10	3x120	2	600	25Б	0,325	0,282	0,27	0,324
		ААШВу-10	3x120	2	850		0,325	0,282	0,27	0,459
ПС-33 РУ 10кВ	ААШВу-10	3x185	2	800	26Б	0,211	0,262	0,32	0,512	
РП-101 РУ 10кВ	ААШВ-10	3x185	4	640	27А	0,211	0,262	0,32	0,819	
2	РП-19 РУ 10кВ (параллельное включение КЛ с разными марками)	ЦААШВу-10	3x240	6	230	1	0,161	0,254	0,36	0,497
		ПвВнг(А)- LS	3x150	1	370		0,159	0,27	0,357	0,132
	ПС-13 РУ 10кВ	ЦААШВу-10	3x185	6	300	3	0,211	0,262	0,32	0,576
	КТП 2 РТП-54а Тр-тор №1 1000 кВА	ААШВу-10	3x95	1	820	5А	0,411	0,294	0,23	0,189
	РТП-54а Тр-тор №3 6300 кВА	ААШВу-10	3x150	2	810	5Б	0,265	0,27	0,29	0,470
	РП-91 РУ 10кВ	ЦААШВу-10	3x185	4	1980	6А	0,211	0,262	0,32	2,534
	Перемышка с ГПП- 7Б	ЦААШВу-10	3x185	3		6Б	0,211	0,262	0,32	
	РП-92 РУ 10кВ (последов. включ. КЛ с разными марками)	ЦААШВу-10	3x185	3	400	7А,Б	0,211	0,262	0,32	0,384
		ААШВ-10	3x185	3	200		0,211	0,262	0,32	0,192
	РП-214 РУ 10кВ	ЦААШВ-10	3x185	2	900	9	0,211	0,262	0,32	0,576
	РП-155 РУ 10кВ	АПВнг(В)- LS	3x240	2	700	10А,Б	0,161	0,254	0,429	0,6006
Тр-тор №2 320 кВА	ААШВ-10	3x70	1	90	11А	0,568	0,312	0,22	0,0198	



Таблица П.Б.6 – Величины суммарных ёмкостей КЛ фидеров секций ЗРУ-10 кВ при параллельной работе секций 1 и 2 ГПП-2

Секция ГПП-2	Ячейка №	Трасса (конец)	$C_{\Sigma}$ , мкФ		
1	15АБ	РП-92 РУ 10кВ	1,062	11,6	21,7
	16А	КТП 1 РТП-54а Тр-р №2 1000 кВА	0,209		
	16Б	РТП-54а Тр-р №1 6300 кВА	0,603		
	17	РП-220 РУ 10кВ	3,714		
	18А,Б	РП-155 РУ 10кВ	0,825		
	20А	Тр-р № 1 630кВА	0,0356		
	21	РП-19 РУ 10кВ	0,704		
	23	ПС-13 РУ 10кВ	1,43		
	25А	РП-103 РУ 10кВ	0,670		
	25Б	ПС-56 РУ 10кВ	0,892		
	26Б	РП-33 РУ 10кВ	0,521		
27А	РП-101 РУ 10кВ	0,957			
2	1	РП-19 РУ 10кВ	0,672	10,1	
	3	ПС-13 РУ 10кВ	1,429		
	5А	КТП 2 РТП-54а Тр-р №1 1000 кВА	0,189		
	5Б	РТП-54а Тр-р №3 6300 кВА	0,599		
	6А	РП-91 РУ 10кВ	2,825		
	7А,Б	РП-92 РУ 10кВ	1,138		
	9	РП-214 РУ 10кВ	1,237		
	10А,Б	РП-155 РУ 10кВ	0,886		
	11А	Тр-р №2 320 кВА	0,0198		
	11Б	РП-101 РУ 10кВ	1,056		
	11В	ТСН-2 630 кВА	0,03105		

Таблица П.Б.7 – Технические параметры КЛ РУ-10 кВ РП-19, питающих электроприёмники

Секция	Ячейка №	Трасса(конец)	Марка ВЛ/КЛ	Сечение ВЛ/КЛ	Кол- во парал. КЛ	Длина, м	$R_0$ , Ом/км	$L_0$ , мГн/км	$C_{уд}$ , мкФ/км	$C_{\Sigma}$ , мкФ
1	1	Клеть №1 Тр-тор №1 10/3 кВ 12 МВА	ПвВнг(А)- LS-10	3(1x400/35)	1	35	0,063	0,275	0,531	0,0186
	3	Клеть №3 Тр-тор №3 10/3 кВ 12 МВА	ПвВнг(А)- LS-10	3(1x400/35)	1	47	0,063	0,275	0,531	0,0250
2	8	Клеть №2 Тр-тор №2 10/3 кВ 12 МВА	ПвВнг(А)- LS-10	3(1x400/35)	1	50	0,063	0,275	0,531	0,0265
	10	Клеть №4 Тр-тор №4 10/3 кВ 12 МВА	ПвВнг(А)- LS-10	3(1x400/35)	1	63	0,063	0,275	0,531	0,0335
	11	Моталка Тр-тор №5 10/3 кВ 4,8 МВА	ПвВнг(А)- LS-10	3(1x150/35)	1	70	0,159	0,275	0,531	0,0372

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

Таблица П.В.1 – Таблица углов переключения силовых ключей АВ, аналогичная используемой в ПЧ-АВ главных электроприводов стана горячей прокатки 1750 ЗАО «ММК Metalurji»

$m$	$a_1, ^\circ$	$a_2, ^\circ$	$a_3, ^\circ$	$a_4, ^\circ$	$a_5, ^\circ$
0,99	15,61	27,17	33,08	45,78	55,52
1,01	16,21	26,91	32,93	46,28	55,02
1,02	16,70	26,78	32,74	46,75	54,62
1,03	17,16	26,71	32,52	47,22	54,29
1,04	17,61	26,70	32,27	47,70	54,00
1,06	18,06	26,71	32,00	48,20	53,76
1,07	18,52	26,76	31,72	48,73	53,58
1,08	18,99	26,84	31,43	49,33	53,48
1,09	19,48	26,96	31,12	50,03	53,50
1,11	20,02	27,17	30,78	50,96	53,79
1,12	20,64	27,70	30,27	52,55	54,97
1,13	17,46	18,15	21,81	54,70	57,60
1,15	16,16	17,75	22,52	55,71	57,89
1,16	15,54	18,12	23,42	57,82	59,21

Таблица П.В.2 – Таблица углов переключения силовых ключей АВ, аналогичная используемой в ПЧ-АВ электропривода клетки 1 стана холодной прокатки ЧерМК ПАО «Северсталь»

$m$	$a_1, ^\circ$	$a_2, ^\circ$	$a_3, ^\circ$
0,382	54,63	64,07	80,88
0,395	54,44	64,14	80,53
0,407	54,25	64,21	80,17
0,420	54,05	64,27	79,81
0,433	53,85	64,32	79,43
0,446	53,65	64,36	79,05
0,458	53,45	64,39	78,66
0,471	53,24	64,41	78,26
0,484	53,04	64,41	77,84
0,497	52,83	64,40	77,42
0,509	52,61	64,37	76,98
0,522	52,39	64,32	76,52
0,535	52,17	64,25	76,04
0,547	51,94	64,15	75,54
0,560	51,71	64,02	75,02
0,573	51,47	63,85	74,47
0,586	51,22	63,65	73,89
0,598	50,96	63,40	73,27

## Продолжение таблицы П.В.2

$m$	$a_1, ^\circ$	$a_2, ^\circ$	$a_3, ^\circ$
0,611	50,68	63,09	72,61
0,624	50,38	62,72	71,90
0,637	50,07	62,27	71,13
0,649	49,72	61,72	70,29
0,662	49,33	61,05	69,37
0,675	48,88	60,24	68,36
0,688	48,36	59,25	67,25
0,700	47,73	58,05	66,01
0,713	46,95	56,60	64,67
0,726	45,97	54,89	63,25
0,738	44,74	52,93	61,80
0,751	43,27	50,82	60,42
0,764	41,62	48,73	59,20
0,777	39,94	46,82	58,17
0,789	38,32	45,18	57,30
0,802	36,83	43,83	56,56
0,815	35,49	42,73	55,92
0,828	34,29	41,84	55,33
0,840	33,21	41,13	54,79
0,853	32,23	40,56	54,28
0,866	31,33	40,10	53,79
0,879	30,50	39,72	53,31
0,891	29,73	39,42	52,83
0,904	29,01	39,17	52,36
0,917	28,32	38,97	51,89
0,929	27,66	38,80	51,42
0,942	27,04	38,66	50,94
0,955	26,43	38,55	50,46
0,968	25,85	38,44	49,96
0,980	25,28	38,35	49,46
0,993	24,72	38,26	48,94
1,006	24,17	38,16	48,40
1,019	23,63	38,06	47,84
1,031	23,10	37,94	47,25
1,044	22,57	37,80	46,63
1,057	22,04	37,63	45,97
1,070	21,51	37,40	45,25
1,082	20,97	37,12	44,47
1,095	20,42	36,74	43,60
1,108	19,86	36,23	42,60
1,120	19,26	35,54	41,44
1,133	18,61	34,57	40,03
1,146	17,86	33,14	38,23
1,159	16,89	30,91	35,79
1,171	15,22	26,95	32,17
1,184	9,14	17,70	26,44

Таблица П.В.3 – Таблица углов переключения силовых ключей АВ, аналогичная используемой в ПЧ-АВ электроприводов клетей 2, 4 стана холодной прокатки ЧерМК ПАО «Северсталь»

$m$	$a_1, ^\circ$	$a_2, ^\circ$	$a_3, ^\circ$	$a_4, ^\circ$	$a_5, ^\circ$	$a_6, ^\circ$	$a_7, ^\circ$
0,395	53,144	56,478	64,065	71,898	78,177	86,023	89,984
0,407	52,930	56,250	63,644	71,479	77,227	84,553	88,835
0,420	52,478	55,616	62,803	70,259	75,386	82,666	87,608
0,433	51,467	54,134	61,246	68,040	72,974	81,075	86,666
0,446	50,029	52,235	59,707	66,223	71,403	80,347	86,126
0,458	48,694	50,685	58,709	65,198	70,585	80,058	85,765
0,471	47,619	49,559	58,062	64,588	70,087	79,925	85,464
0,484	46,767	48,741	57,595	64,175	69,731	79,852	85,183
0,497	46,079	48,132	57,225	63,867	69,446	79,805	84,907
0,509	45,509	47,667	56,910	63,617	69,199	79,764	84,628
0,522	45,025	47,304	56,630	63,404	68,974	79,722	84,341
0,535	44,605	47,014	56,372	63,212	68,762	79,669	84,040
0,547	44,232	46,778	56,128	63,034	68,557	79,600	83,721
0,560	43,897	46,584	55,893	62,863	68,353	79,507	83,379
0,573	43,589	46,419	55,662	62,693	68,146	79,382	83,005
0,586	43,303	46,276	55,432	62,520	67,932	79,214	82,591
0,598	43,033	46,148	55,198	62,335	67,704	78,986	82,123
0,611	42,772	46,027	54,954	62,129	67,453	78,676	81,580
0,624	42,514	45,903	54,690	61,887	67,164	78,246	80,933
0,637	42,250	45,760	54,390	61,578	66,806	77,638	80,131
0,649	41,962	45,567	54,014	61,137	66,317	76,746	79,094
0,662	41,599	45,239	53,459	60,401	65,543	75,380	77,686
0,675	40,990	44,482	52,387	58,908	64,099	73,270	75,772
0,688	39,523	42,410	50,120	56,148	61,806	70,759	73,744
0,700	37,163	39,493	47,979	54,032	60,216	69,190	72,467
0,713	35,214	37,487	46,899	53,048	59,372	68,270	71,631
0,726	33,827	36,267	46,252	52,447	58,746	67,534	70,922
0,738	32,790	35,484	45,749	51,948	58,161	66,835	70,243
0,751	31,959	34,941	45,280	51,441	57,548	66,121	69,560
0,764	31,249	34,527	44,790	50,866	56,870	65,369	68,862
0,777	30,606	34,172	44,232	50,175	56,104	64,577	68,149
0,789	29,990	33,819	43,562	49,334	55,247	63,763	67,433
0,802	29,371	33,417	42,742	48,339	54,329	62,961	66,734
0,815	28,728	32,927	41,766	47,248	53,420	62,219	66,074
0,828	28,052	32,337	40,687	46,177	52,599	61,571	65,467
0,840	27,352	31,673	39,602	45,246	51,911	61,022	64,911
0,853	26,650	30,981	38,593	44,511	51,351	60,551	64,392
0,866	25,964	30,306	37,698	43,963	50,888	60,126	63,892
0,879	25,305	29,674	36,914	43,565	50,488	59,720	63,394
0,891	24,678	29,094	36,225	43,275	50,123	59,308	62,884
0,904	24,082	28,563	35,607	43,058	49,770	58,870	62,349
0,917	23,512	28,072	35,040	42,882	49,406	58,386	61,778
0,929	22,963	27,609	34,504	42,720	49,011	57,835	61,157
0,942	22,425	27,159	33,980	42,543	48,555	57,194	60,476
0,955	21,888	26,702	33,446	42,310	47,996	56,438	59,722
0,968	21,335	26,208	32,871	41,964	47,276	55,547	58,891
0,980	20,744	25,633	32,213	41,416	46,313	54,519	57,996
0,993	20,076	24,907	31,406	40,551	45,035	53,417	57,085

## Продолжение таблицы П.В.3

$m$	$a_1, ^\circ$	$a_2, ^\circ$	$a_3, ^\circ$	$a_4, ^\circ$	$a_5, ^\circ$	$a_6, ^\circ$	$a_7, ^\circ$
1,006	19,287	23,958	30,398	39,327	43,498	52,406	56,246
1,019	18,363	22,803	29,245	37,949	41,979	51,667	55,554
1,031	17,372	21,600	28,133	36,740	40,743	51,227	55,006
1,044	16,405	20,513	27,188	35,815	39,809	50,987	54,548
1,057	15,516	19,601	26,414	35,119	39,084	50,850	54,128
1,070	14,714	18,854	25,769	34,572	38,480	50,754	53,712
1,082	13,993	18,239	25,211	34,111	37,942	50,655	53,273
1,095	13,338	17,723	24,706	33,695	37,435	50,514	52,778
1,108	12,732	17,277	24,229	33,288	36,928	50,274	52,178
1,120	12,157	16,868	23,753	32,851	36,388	49,826	51,369
1,133	11,583	16,443	23,229	32,297	35,737	48,869	50,067
1,146	10,879	15,758	22,399	31,132	34,506	46,081	47,048

Таблица П.В.4 – Таблица углов переключения силовых ключей АВ, аналогичная используемой в ПЧ-АВ электропривода клетки 3 стана холодной прокатки ЧерМК ПАО «Северсталь»

$m$	$a_1, ^\circ$	$a_2, ^\circ$	$a_3, ^\circ$	$a_4, ^\circ$	$a_5, ^\circ$	$a_6, ^\circ$	$a_7, ^\circ$
0,79	1,006	1,591	1,799	23,004	25,101	27,880	42,810
0,8	1,019	1,419	1,807	22,737	25,219	27,717	42,640
0,81	1,031	1,355	2,074	22,285	25,341	27,829	42,597
0,82	1,044	1,288	2,354	21,824	25,456	27,957	42,540
0,83	1,057	1,171	2,413	21,521	25,584	27,822	42,214
0,84	1,070	1,106	2,823	20,942	25,657	28,104	42,211
0,85	1,082	1,041	3,236	20,370	25,721	28,397	42,197
0,86	1,095	0,973	3,657	19,798	25,774	28,708	42,172
0,87	1,108	0,903	4,093	19,217	25,811	29,049	42,138
0,88	1,120	0,831	4,553	18,622	25,824	29,434	42,106
0,89	1,133	0,756	5,042	18,007	25,805	29,875	42,093
0,9	1,146	0,679	5,567	17,370	25,743	30,384	42,123
0,91	1,159	0,602	6,127	16,713	25,629	30,968	42,224

Таблица П.В.5 – Таблица углов переключения силовых ключей АВ, аналогичная используемой в ПЧ-АВ электропривода натяжной моталки стана холодной прокатки ЧерМК ПАО «Северсталь»

$m$	$a_1, ^\circ$	$a_2, ^\circ$	$a_3, ^\circ$	$a_4, ^\circ$	$a_5, ^\circ$	$a_6, ^\circ$	$a_7, ^\circ$
0,929	3,81	3,95	20,52	24,31	33,04	39,60	45,93
0,942	3,71	4,09	20,22	24,25	32,81	39,70	45,81
0,955	3,62	4,23	19,95	24,20	32,59	39,80	45,68
0,968	3,54	4,37	19,68	24,17	32,36	39,89	45,53
0,980	3,45	4,50	19,43	24,15	32,14	40,00	45,39
0,993	3,38	4,64	19,18	24,13	31,91	40,08	45,22
1,006	3,32	4,77	18,94	24,11	31,67	40,16	45,05
1,019	3,26	4,90	18,70	24,10	31,43	40,23	44,86
1,031	3,20	5,02	18,47	24,08	31,19	40,30	44,67
1,044	3,16	5,15	18,24	24,06	30,94	40,36	44,46
1,057	3,11	5,27	18,01	24,04	30,69	40,40	44,23
1,070	3,08	5,39	17,79	24,02	30,42	40,42	43,99
1,082	3,05	5,50	17,56	23,98	30,15	40,43	43,72
1,095	3,03	5,62	17,33	23,93	29,86	40,39	43,40
1,108	3,03	5,73	17,09	23,86	29,55	40,31	43,05
1,120	3,04	5,83	16,85	23,76	29,21	40,16	42,62
1,133	3,08	5,94	16,59	23,62	28,83	39,89	42,08
1,146	3,17	6,06	16,30	23,41	28,38	39,44	41,37
1,159	3,32	6,18	15,98	23,08	27,82	38,66	40,36



## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Таблица П.Г.1 – Таблица углов переключения силовых ключей, рассчитанная для усовершенствованной СУ АВ по методу ШИМ с УВГ с 5 переключениями за  $\frac{1}{4}$  периода и удалением 5, 7, 11, 13 гармоник

$t$	$a_1, ^\circ$	$a_2, ^\circ$	$a_3, ^\circ$	$a_4, ^\circ$	$a_5, ^\circ$
0,382	47,42	51,74	65,24	73,62	83,92
0,395	47,33	51,77	65,05	73,70	83,69
0,407	47,23	51,79	64,87	73,77	83,45
0,420	47,13	51,82	64,68	73,85	83,20
0,433	47,03	51,84	64,49	73,91	82,95
0,446	46,93	51,86	64,29	73,97	82,69
0,458	46,83	51,87	64,10	74,02	82,43
0,471	46,73	51,88	63,90	74,06	82,15
0,484	46,62	51,88	63,69	74,09	81,87
0,497	46,52	51,88	63,48	74,11	81,58
0,509	46,41	51,87	63,27	74,11	81,27
0,522	46,30	51,86	63,05	74,10	80,95
0,535	46,18	51,84	62,82	74,07	80,61
0,547	46,07	51,81	62,58	74,02	80,25
0,560	45,95	51,77	62,34	73,94	79,87
0,573	45,83	51,72	62,08	73,82	79,45
0,586	45,70	51,65	61,81	73,67	79,00
0,598	45,56	51,57	61,52	73,47	78,51
0,611	45,42	51,46	61,21	73,20	77,96
0,624	45,26	51,33	60,87	72,84	77,34
0,637	45,08	51,15	60,48	72,38	76,63
0,649	44,87	50,90	60,03	71,76	75,80
0,662	44,62	50,56	59,47	70,93	74,79
0,675	44,27	50,03	58,74	69,80	73,57
0,688	43,76	49,19	57,71	68,25	72,07
0,700	42,89	47,75	56,22	66,24	70,33
0,713	41,39	45,48	54,33	64,08	68,60
0,726	39,35	42,84	52,64	62,33	67,20
0,738	37,34	40,62	51,49	61,11	66,14
0,751	35,66	38,97	50,68	60,17	65,24
0,764	34,29	37,77	50,04	59,34	64,41
0,777	33,15	36,88	49,46	58,51	63,58
0,789	32,17	36,17	48,88	57,65	62,73
0,802	31,29	35,58	48,24	56,71	61,85
0,815	30,47	35,03	47,53	55,66	60,94
0,828	29,67	34,49	46,69	54,51	60,00
0,840	28,87	33,89	45,70	53,26	59,06
0,853	28,03	33,20	44,56	51,98	58,16
0,866	27,15	32,41	43,31	50,74	57,34

Продолжение таблицы П.Г.1

$m$	$a_1, ^\circ$	$a_2, ^\circ$	$a_3, ^\circ$	$a_4, ^\circ$	$a_5, ^\circ$
0,879	26,22	31,52	42,03	49,65	56,62
0,891	25,29	30,59	40,82	48,76	56,01
0,904	24,37	29,70	39,73	48,08	55,48
0,917	23,50	28,88	38,77	47,59	55,02
0,929	22,68	28,14	37,93	47,24	54,60
0,942	21,92	27,50	37,19	46,99	54,21
0,955	21,22	26,94	36,53	46,82	53,84
0,968	20,57	26,45	35,92	46,70	53,48
0,980	19,96	26,02	35,36	46,62	53,13
0,993	19,39	25,64	34,82	46,56	52,77
1,006	18,86	25,30	34,32	46,52	52,41
1,019	18,35	24,98	33,82	46,49	52,05
1,031	17,86	24,70	33,34	46,45	51,67
1,044	17,40	24,42	32,86	46,42	51,27
1,057	16,94	24,16	32,38	46,36	50,85
1,070	16,50	23,90	31,90	46,28	50,39
1,082	16,07	23,64	31,41	46,16	49,89
1,095	15,64	23,37	30,90	45,97	49,31
1,108	15,21	23,07	30,36	45,68	48,64
1,120	14,77	22,73	29,78	45,22	47,79
1,133	14,31	22,31	29,13	44,45	46,65
1,146	13,78	21,70	28,29	43,01	44,88
1,159	12,96	20,38	26,76	39,70	41,46

Таблица П.Г.2 – Таблица углов переключения силовых ключей, рассчитанная для усовершенствованной СУ АВ по методу ШИМ с УВГ с 7 переключениями за 1/4 периода и удалением 5, 7, 11, 13, 17, 19 гармоник

$m$	$a_1, ^\circ$	$a_2, ^\circ$	$a_3, ^\circ$	$a_4, ^\circ$	$a_5, ^\circ$	$a_6, ^\circ$	$a_7, ^\circ$
0,407	52,93	56,25	63,64	71,48	77,23	84,55	88,84
0,420	52,48	55,62	62,80	70,26	75,39	82,67	87,61
0,433	51,47	54,13	61,25	68,04	72,97	81,07	86,67
0,446	50,03	52,24	59,71	66,22	71,40	80,35	86,13
0,458	48,69	50,68	58,71	65,20	70,58	80,06	85,77
0,471	47,62	49,56	58,06	64,59	70,09	79,92	85,46
0,484	46,77	48,74	57,59	64,18	69,73	79,85	85,18
0,497	46,08	48,13	57,22	63,87	69,45	79,80	84,91
0,509	45,51	47,67	56,91	63,62	69,20	79,76	84,63
0,522	45,02	47,30	56,63	63,40	68,97	79,72	84,34
0,535	44,60	47,01	56,37	63,21	68,76	79,67	84,04
0,547	44,23	46,78	56,13	63,03	68,56	79,60	83,72
0,560	43,90	46,58	55,89	62,86	68,35	79,51	83,38
0,573	43,59	46,42	55,66	62,69	68,15	79,38	83,01

## Продолжение таблицы П.Г.2

$m$	$a_1, ^\circ$	$a_2, ^\circ$	$a_3, ^\circ$	$a_4, ^\circ$	$a_5, ^\circ$	$a_6, ^\circ$	$a_7, ^\circ$
0,586	43,30	46,28	55,43	62,52	67,93	79,21	82,59
0,598	43,03	46,15	55,20	62,33	67,70	78,99	82,12
0,611	42,77	46,03	54,95	62,13	67,45	78,68	81,58
0,624	42,51	45,90	54,69	61,89	67,16	78,25	80,93
0,637	42,25	45,76	54,39	61,58	66,81	77,64	80,13
0,649	41,96	45,57	54,01	61,14	66,32	76,75	79,09
0,662	41,60	45,24	53,46	60,40	65,54	75,38	77,69
0,675	40,99	44,48	52,39	58,91	64,10	73,27	75,77
0,688	39,52	42,41	50,12	56,15	61,81	70,76	73,74
0,700	37,16	39,49	47,98	54,03	60,22	69,19	72,47
0,713	35,21	37,49	46,90	53,05	59,37	68,27	71,63
0,726	33,83	36,27	46,25	52,45	58,75	67,53	70,92
0,738	32,79	35,48	45,75	51,95	58,16	66,84	70,24
0,751	31,96	34,94	45,28	51,44	57,55	66,12	69,56
0,764	31,25	34,53	44,79	50,87	56,87	65,37	68,86
0,777	30,61	34,17	44,23	50,18	56,10	64,58	68,15
0,789	29,99	33,82	43,56	49,33	55,25	63,76	67,43
0,802	29,37	33,42	42,74	48,34	54,33	62,96	66,73
0,815	28,73	32,93	41,77	47,25	53,42	62,22	66,07
0,828	28,05	32,34	40,69	46,18	52,60	61,57	65,47
0,840	27,35	31,67	39,60	45,25	51,91	61,02	64,91
0,853	26,65	30,98	38,59	44,51	51,35	60,55	64,39
0,866	25,96	30,31	37,70	43,96	50,89	60,13	63,89
0,879	25,30	29,67	36,91	43,57	50,49	59,72	63,39
0,891	24,68	29,09	36,22	43,28	50,12	59,31	62,88
0,904	24,08	28,56	35,61	43,06	49,77	58,87	62,35
0,917	23,51	28,07	35,04	42,88	49,41	58,39	61,78
0,929	22,96	27,61	34,50	42,72	49,01	57,83	61,16
0,942	22,42	27,16	33,98	42,54	48,55	57,19	60,48
0,955	21,89	26,70	33,45	42,31	48,00	56,44	59,72
0,968	21,34	26,21	32,87	41,96	47,28	55,55	58,89
0,980	20,74	25,63	32,21	41,42	46,31	54,52	58,00
0,993	20,08	24,91	31,41	40,55	45,03	53,42	57,09
1,006	19,29	23,96	30,40	39,33	43,50	52,41	56,25
1,019	18,36	22,80	29,25	37,95	41,98	51,67	55,55
1,031	17,37	21,60	28,13	36,74	40,74	51,23	55,01
1,044	16,41	20,51	27,19	35,81	39,81	50,99	54,55
1,057	15,52	19,60	26,41	35,12	39,08	50,85	54,13
1,070	14,71	18,85	25,77	34,57	38,48	50,75	53,71
1,082	13,99	18,24	25,21	34,11	37,94	50,65	53,27
1,095	13,34	17,72	24,71	33,69	37,43	50,51	52,78
1,108	12,73	17,28	24,23	33,29	36,93	50,27	52,18
1,120	12,16	16,87	23,75	32,85	36,39	49,83	51,37
1,133	11,58	16,44	23,23	32,30	35,74	48,87	50,07

Таблица П.Г.3 – Таблица углов переключения силовых ключей, рассчитанная для усовершенствованной СУ АВ по методу ШИМ с УВГ с 9 переключениями за 1/4 периода и удалением 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25 гармоник

$m$	$a_1, ^\circ$	$a_2, ^\circ$	$a_3, ^\circ$	$a_4, ^\circ$	$a_5, ^\circ$	$a_6, ^\circ$	$a_7, ^\circ$	$a_8, ^\circ$	$a_9, ^\circ$
0,382	41,01	42,61	52,09	55,23	63,28	67,88	74,68	80,62	86,39
0,395	40,97	42,62	52,01	55,25	63,18	67,92	74,55	80,68	86,25
0,407	40,93	42,63	51,93	55,27	63,07	67,96	74,42	80,75	86,11
0,420	40,89	42,63	51,86	55,29	62,96	67,99	74,28	80,81	85,97
0,433	40,85	42,64	51,78	55,30	62,84	68,03	74,14	80,87	85,82
0,446	40,81	42,65	51,70	55,32	62,73	68,05	74,00	80,93	85,67
0,458	40,77	42,65	51,62	55,33	62,61	68,08	73,85	80,98	85,52
0,471	40,73	42,65	51,53	55,34	62,49	68,10	73,71	81,03	85,36
0,484	40,69	42,66	51,45	55,35	62,37	68,11	73,55	81,07	85,20
0,497	40,65	42,66	51,37	55,35	62,25	68,12	73,40	81,11	85,03
0,509	40,60	42,66	51,28	55,35	62,12	68,13	73,23	81,13	84,85
0,522	40,56	42,65	51,19	55,34	61,99	68,13	73,07	81,15	84,66
0,535	40,51	42,65	51,10	55,33	61,85	68,12	72,89	81,16	84,46
0,547	40,46	42,64	51,00	55,32	61,71	68,10	72,71	81,15	84,25
0,560	40,41	42,63	50,91	55,30	61,57	68,07	72,52	81,13	84,03
0,573	40,36	42,62	50,81	55,27	61,41	68,03	72,31	81,09	83,78
0,586	40,31	42,60	50,70	55,24	61,25	67,97	72,09	81,01	83,50
0,598	40,26	42,58	50,59	55,19	61,08	67,90	71,86	80,90	83,19
0,611	40,20	42,55	50,47	55,13	60,89	67,79	71,60	80,74	82,83
0,624	40,13	42,51	50,34	55,05	60,69	67,65	71,30	80,50	82,40
0,637	40,06	42,46	50,18	54,93	60,45	67,45	70,94	80,14	81,87
0,649	39,97	42,38	49,99	54,76	60,15	67,15	70,50	79,60	81,16
0,662	39,84	42,23	49,73	54,45	59,71	66,63	69,85	78,74	80,17
0,675	39,58	41,90	49,20	53,76	58,90	65,56	68,72	77,25	78,67
0,688	38,69	40,63	47,64	51,68	56,94	63,19	66,59	75,02	76,63
0,700	36,36	37,72	45,34	49,14	54,99	61,19	64,91	73,36	75,08
0,713	34,30	35,57	44,31	48,04	54,09	60,19	63,94	72,22	73,93
0,726	32,90	34,28	43,68	47,30	53,33	59,26	62,99	71,04	72,76
0,738	31,81	33,34	42,96	46,34	52,33	57,98	61,78	69,65	71,45
0,751	30,72	32,36	41,72	44,70	50,85	56,26	60,32	68,16	70,11
0,764	29,43	31,09	39,91	42,62	49,40	54,75	59,10	66,94	68,98
0,777	28,12	29,77	38,33	41,11	48,50	53,80	58,26	66,01	68,07
0,789	26,98	28,68	37,21	40,21	47,89	53,09	57,56	65,15	67,22
0,802	26,02	27,81	36,38	39,61	47,34	52,37	56,83	64,25	66,34
0,815	25,17	27,07	35,65	39,09	46,70	51,50	55,98	63,26	65,41
0,828	24,37	26,37	34,89	38,49	45,80	50,34	54,98	62,18	64,45
0,840	23,54	25,61	33,98	37,65	44,57	48,96	53,93	61,14	63,54
0,853	22,64	24,74	32,89	36,57	43,20	47,67	53,04	60,27	62,75
0,866	21,72	23,82	31,80	35,52	42,04	46,79	52,40	59,57	62,09
0,879	20,85	22,97	30,86	34,69	41,18	46,24	51,92	58,98	61,49
0,891	20,06	22,24	30,08	34,08	40,52	45,89	51,50	58,41	60,91
0,904	19,36	21,61	29,42	33,60	39,97	45,63	51,07	57,82	60,31

## Продолжение таблицы П.Г.3

$m$	$a_1, ^\circ$	$a_2, ^\circ$	$a_3, ^\circ$	$a_4, ^\circ$	$a_5, ^\circ$	$a_6, ^\circ$	$a_7, ^\circ$	$a_8, ^\circ$	$a_9, ^\circ$
0,917	18,73	21,07	28,85	33,21	39,46	45,38	50,60	57,17	59,69
0,929	18,14	20,58	28,31	32,85	38,95	45,08	50,04	56,44	59,03
0,942	17,58	20,11	27,76	32,46	38,40	44,67	49,33	55,64	58,34
0,955	17,02	19,62	27,18	31,99	37,73	44,09	48,45	54,79	57,66
0,968	16,43	19,08	26,51	31,38	36,92	43,29	47,40	53,98	57,03
0,980	15,79	18,46	25,74	30,61	35,96	42,36	46,31	53,33	56,49
0,993	15,11	17,77	24,90	29,76	34,98	41,50	45,37	52,90	56,07
1,006	14,43	17,07	24,09	28,98	34,11	40,84	44,63	52,65	55,74
1,019	13,79	16,42	23,37	28,34	33,41	40,37	44,06	52,53	55,46
1,031	13,20	15,84	22,75	27,84	32,83	40,04	43,59	52,47	55,21
1,044	12,66	15,35	22,22	27,44	32,33	39,80	43,17	52,44	54,97
1,057	12,17	14,92	21,75	27,12	31,89	39,60	42,79	52,43	54,73
1,070	11,73	14,55	21,32	26,84	31,49	39,43	42,43	52,42	54,49
1,082	11,32	14,22	20,93	26,60	31,10	39,26	42,06	52,41	54,23

Таблица П.Г.4 – Таблица углов переключения силовых ключей, рассчитанная для усовершенствованной СУ АВ по методу ШИМ с УВГ с 11 переключениями за 1/4 периода и удалением 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, 29, 31 гармоник

$m$	$a_1, ^\circ$	$a_2, ^\circ$	$a_3, ^\circ$	$a_4, ^\circ$	$a_5, ^\circ$	$a_6, ^\circ$	$a_7, ^\circ$	$a_8, ^\circ$	$a_9, ^\circ$	$a_{10}, ^\circ$	$a_{11}, ^\circ$
0,637	38,62	40,33	47,27	50,66	56,00	61,01	64,86	71,42	73,89	82,01	83,27
0,649	38,55	40,27	47,14	50,55	55,80	60,83	64,56	71,13	73,47	81,52	82,64
0,662	38,46	40,17	46,94	50,33	55,48	60,48	64,10	70,60	72,83	80,68	81,69
0,675	38,22	39,86	46,46	49,71	54,74	59,54	63,09	69,33	71,53	79,08	80,09
0,688	36,86	38,06	44,36	47,13	52,38	56,82	60,70	66,78	69,26	76,88	78,04
0,700	34,40	35,30	42,63	45,31	51,02	55,41	59,49	65,51	68,06	75,57	76,74
0,713	32,80	33,75	41,95	44,55	50,30	54,58	58,63	64,49	67,02	74,32	75,49
0,726	31,65	32,72	41,19	43,58	49,26	53,27	57,36	62,99	65,61	72,80	74,05
0,738	30,39	31,52	39,57	41,57	47,49	51,27	55,70	61,25	64,10	71,32	72,67
0,751	28,94	30,05	37,68	39,59	46,25	49,99	54,65	60,16	63,09	70,24	71,61
0,764	27,69	28,84	36,46	38,52	45,59	49,25	53,94	59,33	62,25	69,26	70,62
0,777	26,67	27,90	35,60	37,84	44,98	48,48	53,15	58,35	61,31	68,17	69,58
0,789	25,75	27,06	34,76	37,14	44,07	47,30	52,04	57,07	60,16	66,99	68,48
0,802	24,77	26,13	33,66	36,08	42,61	45,63	50,75	55,74	59,04	65,89	67,46
0,815	23,71	25,07	32,41	34,83	41,15	44,27	49,83	54,80	58,22	65,02	66,62
0,828	22,71	24,09	31,34	33,85	40,15	43,51	49,26	54,15	57,58	64,27	65,87
0,840	21,84	23,27	30,51	33,15	39,45	43,05	48,77	53,54	56,95	63,51	65,12
0,853	21,08	22,58	29,82	32,61	38,85	42,65	48,22	52,81	56,23	62,67	64,32
0,866	20,37	21,94	29,17	32,08	38,21	42,15	47,46	51,85	55,37	61,77	63,49
0,879	19,66	21,29	28,43	31,43	37,39	41,38	46,37	50,67	54,44	60,86	62,69
0,891	18,89	20,55	27,56	30,57	36,34	40,34	45,13	49,59	53,64	60,09	61,98
0,904	18,10	19,75	26,63	29,66	35,30	39,39	44,11	48,89	53,07	59,48	61,38
0,917	17,33	18,99	25,79	28,88	34,47	38,72	43,40	48,50	52,66	58,96	60,85

## Продолжение таблицы П.Г.4

$m$	$a_1, ^\circ$	$a_2, ^\circ$	$a_3, ^\circ$	$a_4, ^\circ$	$a_5, ^\circ$	$a_6, ^\circ$	$a_7, ^\circ$	$a_8, ^\circ$	$a_9, ^\circ$	$a_{10}, ^\circ$	$a_{11}, ^\circ$
0,929	16,64	18,33	25,09	28,29	33,82	38,27	42,88	48,25	52,30	58,45	60,32
0,942	16,02	17,77	24,51	27,82	33,30	37,93	42,43	48,05	51,91	57,90	59,77
0,955	15,46	17,27	23,99	27,43	32,83	37,64	42,00	47,82	51,46	57,29	59,19
0,968	14,94	16,82	23,50	27,07	32,36	37,34	41,53	47,49	50,88	56,60	58,57
0,980	14,43	16,38	23,01	26,68	31,85	36,94	40,96	46,99	50,12	55,85	57,93
0,993	13,91	15,90	22,45	26,19	31,22	36,37	40,19	46,23	49,14	55,10	57,31
1,006	13,33	15,34	21,78	25,52	30,41	35,55	39,21	45,29	48,07	54,49	56,79
1,019	12,70	14,69	21,01	24,72	29,50	34,64	38,21	44,45	47,17	54,12	56,40
1,031	12,06	14,02	20,24	23,95	28,66	33,89	37,39	43,89	46,53	53,93	56,12
1,044	11,46	13,40	19,58	23,33	27,99	33,36	36,79	43,54	46,06	53,86	55,89
1,057	10,91	12,87	19,02	22,85	27,46	32,99	36,31	43,31	45,68	53,83	55,68
1,070	10,43	12,42	18,54	22,47	27,02	32,71	35,91	43,14	45,34	53,82	55,48
1,082	9,99	12,04	18,13	22,17	26,63	32,48	35,54	42,99	45,02	53,82	55,27
1,095	9,60	11,70	17,77	21,91	26,27	32,27	35,19	42,84	44,68	53,81	55,05
1,108	9,24	11,41	17,43	21,68	25,93	32,07	34,84	42,67	44,32	53,76	54,79
1,120	8,90	11,14	17,10	21,46	25,59	31,86	34,47	42,45	43,92	53,66	54,46

Таблица П.Г.5 – Таблица углов переключения силовых ключей, рассчитанная для усовершенствованной СУ АВ по методу ШИМ с УВГ с 13 переключениями за 1/4 периода и удалением 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, 29, 31, 35, 37 гармоник

$m$	$a_1, ^\circ$	$a_2, ^\circ$	$a_3, ^\circ$	$a_4, ^\circ$	$a_5, ^\circ$	$a_6, ^\circ$	$a_7, ^\circ$	$a_8, ^\circ$	$a_9, ^\circ$	$a_{10}, ^\circ$	$a_{11}, ^\circ$	$a_{12}, ^\circ$	$a_{13}, ^\circ$
0,713	31,85	32,61	40,14	42,01	47,34	50,43	54,52	58,81	61,74	67,20	69,06	75,61	76,49
0,726	30,54	31,36	38,58	40,08	45,51	48,32	52,68	56,82	60,00	65,41	67,45	74,05	75,01
0,738	29,02	29,83	36,64	38,06	44,24	47,00	51,62	55,71	59,00	64,34	66,41	72,92	73,89
0,751	27,79	28,63	35,51	37,07	43,61	46,29	50,91	54,88	58,16	63,36	65,44	71,81	72,78
0,764	26,76	27,68	34,63	36,32	42,79	45,26	49,86	53,63	56,98	62,05	64,21	70,54	71,58
0,777	25,68	26,63	33,44	35,16	41,22	43,44	48,38	52,04	55,65	60,69	63,01	69,36	70,46
0,789	24,52	25,47	32,10	33,83	39,73	42,03	47,43	51,07	54,81	59,81	62,16	68,44	69,55
0,802	23,49	24,47	31,08	32,90	38,83	41,33	46,88	50,43	54,17	59,05	61,41	67,57	68,68
0,815	22,62	23,66	30,29	32,23	38,15	40,82	46,29	49,68	53,40	58,14	60,53	66,61	67,76
0,828	21,80	22,90	29,51	31,55	37,37	40,14	45,33	48,50	52,35	57,00	59,51	65,59	66,81
0,840	20,93	22,05	28,56	30,62	36,26	39,03	43,93	47,08	51,27	55,92	58,59	64,68	65,95
0,853	20,02	21,14	27,53	29,60	35,12	37,94	42,79	46,15	50,58	55,21	57,92	63,96	65,24
0,866	19,17	20,32	26,65	28,78	34,27	37,23	42,07	45,67	50,12	54,66	57,36	63,29	64,56
0,879	18,43	19,62	25,94	28,17	33,63	36,75	41,53	45,34	49,67	54,07	56,76	62,58	63,87
0,891	17,77	19,00	25,33	27,67	33,07	36,34	41,01	44,97	49,09	53,32	56,04	61,80	63,14
0,904	17,13	18,42	24,72	27,14	32,46	35,82	40,34	44,36	48,22	52,35	55,21	60,98	62,38
0,917	16,47	17,79	24,01	26,48	31,67	35,06	39,40	43,42	47,08	51,32	54,40	60,22	61,69
0,929	15,75	17,07	23,19	25,66	30,72	34,13	38,35	42,46	46,04	50,60	53,81	59,62	61,11
0,942	15,04	16,36	22,39	24,88	29,87	33,36	37,52	41,81	45,36	50,23	53,42	59,14	60,61
0,955	14,38	15,72	21,71	24,26	29,22	32,83	36,94	41,42	44,89	50,02	53,09	58,67	60,12
0,968	13,80	15,17	21,15	23,79	28,70	32,45	36,48	41,15	44,50	49,84	52,75	58,17	59,62
0,980	13,28	14,70	20,67	23,40	28,25	32,14	36,07	40,91	44,12	49,63	52,33	57,60	59,07



## Продолжение таблицы П.Г.5

$m$	$a_1, ^\circ$	$a_2, ^\circ$	$a_3, ^\circ$	$a_4, ^\circ$	$a_5, ^\circ$	$a_6, ^\circ$	$a_7, ^\circ$	$a_8, ^\circ$	$a_9, ^\circ$	$a_{10}, ^\circ$	$a_{11}, ^\circ$	$a_{12}, ^\circ$	$a_{13}, ^\circ$
0,993	12,79	14,27	20,21	23,04	27,83	31,84	35,65	40,63	43,68	49,29	51,77	56,95	58,48
1,006	12,32	13,85	19,75	22,66	27,35	31,46	35,14	40,21	43,08	48,71	50,97	56,24	57,87
1,019	11,82	13,37	19,22	22,16	26,75	30,89	34,43	39,51	42,22	47,85	49,95	55,57	57,30
1,031	11,25	12,80	18,54	21,47	25,95	30,06	33,49	38,56	41,16	46,92	48,96	55,11	56,86
1,044	10,63	12,15	17,79	20,68	25,09	29,20	32,57	37,73	40,27	46,29	48,27	54,90	56,57
1,057	10,03	11,52	17,11	20,01	24,38	28,56	31,88	37,20	39,67	45,96	47,82	54,82	56,36
1,070	9,49	10,99	16,55	19,50	23,84	28,13	31,38	36,87	39,24	45,76	47,48	54,80	56,18
1,082	9,02	10,54	16,09	19,11	23,41	27,82	30,98	36,64	38,88	45,62	47,18	54,80	56,00
1,095	8,61	10,17	15,71	18,81	23,04	27,57	30,64	36,45	38,55	45,49	46,89	54,79	55,82
1,108	8,24	9,85	15,37	18,56	22,72	27,36	30,32	36,26	38,22	45,34	46,58	54,77	55,61

Таблица П.Г.6 – Таблица углов переключения силовых ключей, рассчитанная для усовершенствованной СУ АВ по методу ШИМ с УВГ с 7 переключениями за 1/4 периода и удалением 5, 7, 11, 13, 23, 25 гармоник

$m$	$a_1, ^\circ$	$a_2, ^\circ$	$a_3, ^\circ$	$a_4, ^\circ$	$a_5, ^\circ$	$a_6, ^\circ$	$a_7, ^\circ$
0,382	46,78	50,39	56,73	57,95	66,06	74,07	84,05
0,395	46,66	50,35	56,76	58,08	65,96	74,19	83,83
0,407	46,53	50,31	56,78	58,21	65,85	74,30	83,61
0,420	46,41	50,26	56,81	58,35	65,75	74,40	83,39
0,433	46,29	50,22	56,82	58,49	65,65	74,51	83,16
0,446	46,16	50,17	56,84	58,63	65,56	74,61	82,92
0,458	46,04	50,11	56,85	58,77	65,47	74,70	82,68
0,471	45,91	50,06	56,86	58,92	65,38	74,78	82,43
0,484	45,78	50,00	56,87	59,06	65,29	74,86	82,18
0,497	45,66	49,95	56,87	59,22	65,22	74,93	81,92
0,509	45,53	49,88	56,87	59,37	65,14	74,99	81,65
0,522	45,40	49,82	56,86	59,52	65,07	75,04	81,36
0,535	45,27	49,75	56,85	59,68	65,00	75,07	81,07
0,547	45,14	49,68	56,82	59,84	64,94	75,09	80,76
0,560	45,01	49,60	56,80	60,00	64,88	75,08	80,43
0,573	44,87	49,52	56,76	60,15	64,82	75,05	80,07
0,586	44,73	49,43	56,71	60,31	64,76	74,99	79,69
0,598	44,59	49,34	56,64	60,45	64,70	74,88	79,26
0,611	44,44	49,23	56,56	60,58	64,63	74,71	78,79
0,624	44,29	49,10	56,45	60,67	64,53	74,47	78,24
0,637	44,12	48,95	56,30	60,71	64,38	74,10	77,61
0,649	43,93	48,75	56,07	60,63	64,12	73,56	76,83
0,662	43,70	48,47	55,70	60,26	63,61	72,75	75,84
0,675	43,36	47,95	54,90	59,19	62,56	71,50	74,54
0,688	42,64	46,65	52,94	56,82	60,81	69,85	73,00
0,700	41,15	44,27	50,71	54,97	59,58	68,31	71,52
0,713	39,40	42,11	49,77	54,49	58,87	66,85	70,10
0,726	37,79	40,46	49,39	54,19	58,00	65,17	68,61

Продолжение таблицы П.Г.6

$m$	$a_1, ^\circ$	$a_2, ^\circ$	$a_3, ^\circ$	$a_4, ^\circ$	$a_5, ^\circ$	$a_6, ^\circ$	$a_7, ^\circ$
0,738	36,29	39,03	48,78	52,90	56,16	63,20	67,11
0,751	34,70	37,48	47,05	49,86	53,70	61,64	65,94
0,764	33,18	36,00	45,29	47,82	52,63	60,84	65,14
0,777	31,96	34,95	44,39	47,07	52,25	60,27	64,45
0,789	30,98	34,23	43,90	46,82	52,03	59,71	63,74
0,802	30,17	33,70	43,54	46,71	51,83	59,05	62,97
0,815	29,45	33,28	43,17	46,55	51,53	58,23	62,10
0,828	28,77	32,88	42,67	46,16	50,95	57,13	61,10
0,840	28,07	32,41	41,80	45,15	49,78	55,64	59,98
0,853	27,23	31,61	39,99	42,95	47,92	53,97	58,91
0,866	26,14	30,29	37,69	40,75	46,48	52,78	58,11
0,879	25,00	28,98	36,30	39,88	45,75	52,05	57,51
0,891	24,00	27,99	35,61	39,70	45,28	51,49	56,99
0,904	23,13	27,25	35,22	39,78	44,91	51,01	56,51
0,917	22,38	26,70	34,95	39,95	44,57	50,56	56,04

Таблица П.Г.7 – Таблица углов переключения силовых ключей, рассчитанная для усовершенствованной СУ АВ по методу ШИМ с УВГ с 9 переключениями за 1/4 периода и удалением 5, 7, 23, 25, 35, 37, 47, 49 гармоник

$m$	$a_1, ^\circ$	$a_2, ^\circ$	$a_3, ^\circ$	$a_4, ^\circ$	$a_5, ^\circ$	$a_6, ^\circ$	$a_7, ^\circ$	$a_8, ^\circ$	$a_9, ^\circ$
0,987	17,25	21,29	27,49	28,23	30,97	33,50	35,59	45,38	52,32
0,993	17,17	21,27	27,41	28,36	31,03	33,72	35,74	45,41	52,13
1,006	17,02	21,25	27,09	28,42	31,05	34,04	36,01	45,50	51,77
1,019	16,89	21,27	26,73	28,38	31,00	34,24	36,22	45,64	51,42
1,031	16,80	21,35	26,37	28,32	30,93	34,36	36,38	45,82	51,10
1,044	16,74	21,49	26,04	28,30	30,89	34,42	36,51	46,04	50,80
1,057	16,72	21,69	25,74	28,31	30,89	34,43	36,61	46,31	50,53
1,070	16,73	21,97	25,49	28,38	30,93	34,42	36,69	46,64	50,31
1,082	16,78	22,34	25,31	28,51	31,03	34,39	36,76	47,03	50,14
1,095	16,86	22,87	25,27	28,73	31,23	34,37	36,83	47,55	50,07
1,108	17,00	23,89	25,73	29,20	31,73	34,46	36,93	48,39	50,30
1,120	17,29	26,36	28,07	31,14	34,11	36,51	38,12	50,03	51,24
1,127	17,48	27,47	29,07	32,04	35,00	37,79	39,27	50,77	51,59

Таблица П.Г.8 – Таблица углов переключения силовых ключей, рассчитанная для усовершенствованной СУ АВ по методу ШИМ с УВГ с 13 переключениями за  $1/4$  периода и удалением 5, 7, 11, 13, 23, 25, 35, 37, 47, 49, 59, 61 гармоник

$m$	$a_1, ^\circ$	$a_2, ^\circ$	$a_3, ^\circ$	$a_4, ^\circ$	$a_5, ^\circ$	$a_6, ^\circ$	$a_7, ^\circ$	$a_8, ^\circ$	$a_9, ^\circ$	$a_{10}, ^\circ$	$a_{11}, ^\circ$	$a_{12}, ^\circ$	$a_{13}, ^\circ$
1,00	14,67	15,45	17,97	24,04	25,07	27,97	31,58	47,99	52,83	73,86	74,88	84,17	86,80
1,01	14,49	15,53	18,09	24,01	25,05	27,99	31,55	48,14	52,81	73,68	74,81	84,19	86,79
1,02	13,99	15,99	18,53	23,82	24,95	28,09	31,41	48,68	52,66	73,29	74,71	84,31	86,77
1,03	13,68	16,33	18,82	23,62	24,86	28,17	31,27	49,02	52,50	73,17	74,70	84,41	86,73
1,04	13,46	16,61	19,04	23,43	24,78	28,24	31,14	49,25	52,31	73,15	74,70	84,51	86,67
1,06	13,28	16,86	19,21	23,24	24,70	28,30	31,02	49,42	52,10	73,20	74,73	84,59	86,60
1,07	13,13	17,08	19,35	23,05	24,64	28,36	30,90	49,51	51,85	73,32	74,78	84,66	86,52
1,08	13,01	17,30	19,48	22,86	24,58	28,41	30,78	49,53	51,57	73,52	74,89	84,73	86,43
1,09	12,93	17,54	19,62	22,69	24,54	28,45	30,65	49,48	51,23	73,87	75,12	84,81	86,33
1,11	12,84	17,83	19,85	22,60	24,54	28,50	30,53	49,44	50,91	74,44	75,59	84,91	86,26
1,12	12,66	18,20	20,29	22,72	24,63	28,57	30,39	49,70	50,79	75,09	76,27	85,09	86,25
1,13	12,47	18,50	20,77	23,06	24,82	28,67	30,31	50,39	51,14	75,55	76,84	85,33	86,33

Таблица П.Г.9 – Таблица углов переключения силовых ключей, рассчитанная для усовершенствованной СУ АВ по методу ШИМ с ПВГ с 5 переключениями за  $1/4$  периода

$m$	$a_1, ^\circ$	$a_2, ^\circ$	$a_3, ^\circ$	$a_4, ^\circ$	$a_5, ^\circ$
0,80	21,66	43,47	54,77	77,18	86,01
0,81	21,54	43,51	54,54	77,23	85,87
0,82	21,40	43,54	54,28	77,28	85,72
0,83	21,28	43,57	54,06	77,30	85,60
0,84	20,31	45,65	55,47	79,12	87,53
0,85	20,20	45,71	55,25	79,19	87,42
0,86	20,09	45,78	55,04	79,26	87,30
0,87	19,98	45,84	54,83	79,33	87,19
0,88	19,85	45,93	54,61	79,39	87,06
0,89	19,66	46,10	54,45	79,42	86,96
0,90	18,59	47,67	55,15	79,36	87,40
0,91	18,52	47,69	54,90	79,45	87,25
0,92	18,45	47,72	54,71	79,53	87,13
0,93	18,37	47,76	54,47	79,62	86,99
0,94	18,29	47,78	54,23	79,69	86,85
0,95	18,20	47,79	53,96	79,76	86,68
0,96	18,12	47,77	53,69	79,83	86,54
0,97	18,06	47,75	53,44	79,93	86,43
0,98	17,99	47,72	53,16	80,10	86,35
0,99	17,94	47,66	52,87	80,34	86,33
1,00	17,89	47,59	52,59	80,60	86,34
1,01	17,82	47,53	52,28	80,83	86,33
1,02	17,72	47,51	52,01	80,98	86,27

Продолжение таблицы П.Г.9

$t$	$a_1, ^\circ$	$a_2, ^\circ$	$a_3, ^\circ$	$a_4, ^\circ$	$a_5, ^\circ$
1,03	17,59	47,51	51,70	81,04	86,13
1,04	17,44	47,51	51,40	81,01	85,95
1,05	17,26	47,46	51,02	80,89	85,70
1,06	17,04	47,36	50,54	80,64	85,37
1,07	16,81	47,26	50,06	80,37	85,02
1,08	16,58	47,23	49,63	80,19	84,73
1,09	16,39	47,25	49,29	80,11	84,53
1,10	16,22	47,26	48,99	80,07	84,38
1,12	15,66	46,71	47,64	79,69	83,83
1,13	15,59	46,59	47,32	80,37	84,20

Таблица П.Г.10 – Таблица углов переключения силовых ключей, рассчитанная для усовершенствованной СУ АВ по методу ШИМ с ПВГ с 7 переключениями за 1/4 периода

$t$	$a_1, ^\circ$	$a_2, ^\circ$	$a_3, ^\circ$	$a_4, ^\circ$	$a_5, ^\circ$	$a_6, ^\circ$	$a_7, ^\circ$
0,85	1,52	9,35	25,94	26,73	39,17	54,46	62,96
0,86	1,56	9,29	25,92	26,88	39,04	54,58	62,73
0,87	1,63	9,23	25,85	27,00	38,91	54,68	62,50
0,88	3,61	9,26	24,13	25,52	39,35	53,38	60,43
0,89	3,50	9,15	24,19	25,76	39,16	53,59	60,34
0,90	3,36	9,05	24,28	26,06	38,98	53,81	60,27
0,91	3,46	8,53	23,57	26,35	38,78	53,69	60,16
0,92	3,21	8,39	23,56	26,83	38,70	53,83	60,07
0,93	2,82	8,31	23,66	27,53	38,76	53,93	59,91
0,94	2,60	8,24	23,69	28,00	38,72	54,01	59,73
0,95	2,50	8,14	23,70	28,21	38,55	54,15	59,59
0,96	1,06	8,99	25,43	30,28	39,00	55,17	60,23
0,97	1,41	9,16	25,78	30,98	39,13	55,82	60,51
0,98	1,94	9,33	26,03	31,67	39,31	56,25	60,54
0,99	2,74	9,86	26,35	32,95	40,02	56,32	60,27
1,00	3,31	8,08	22,93	31,12	39,00	56,09	60,42
1,01	3,12	8,09	22,81	31,20	38,92	56,40	60,43
1,02	2,90	8,08	22,72	31,26	38,82	56,72	60,38
1,03	2,66	8,06	22,66	31,27	38,72	57,09	60,29
1,04	2,48	8,04	22,62	31,27	38,65	57,42	60,17
1,05	2,34	8,02	22,56	31,28	38,57	57,71	60,04
1,06	2,24	8,02	22,44	31,31	38,46	57,96	59,91
1,07	2,16	8,04	21,74	31,12	37,83	57,95	60,03
1,08	2,14	8,04	21,50	31,19	37,58	58,12	60,00
1,09	2,12	8,04	21,37	31,32	37,42	58,33	59,94
1,10	2,15	8,05	21,27	31,49	37,29	58,55	59,87
1,11	2,23	8,08	21,19	31,71	37,20	58,75	59,79
1,12	2,39	8,12	21,12	32,02	37,16	58,91	59,69

Таблица П.Г.11 – Таблица углов переключения силовых ключей, рассчитанная для усовершенствованной СУ АВ по методу ШИМ с ПВГ с 9 переключениями за 1/4 периода

$m$	$a_1, ^\circ$	$a_2, ^\circ$	$a_3, ^\circ$	$a_4, ^\circ$	$a_5, ^\circ$	$a_6, ^\circ$	$a_7, ^\circ$	$a_8, ^\circ$	$a_9, ^\circ$
1,030	0,35	4,88	19,78	30,00	34,41	49,50	53,70	83,70	85,82
1,040	0,47	5,19	19,93	29,97	34,74	49,74	53,62	83,75	85,45
1,050	0,51	5,48	20,07	29,99	35,04	49,99	53,54	83,79	85,11
1,060	0,52	5,72	20,19	30,10	35,30	50,22	53,44	83,84	84,86
1,070	0,56	5,94	20,30	30,26	35,55	50,43	53,33	83,92	84,67
1,071	0,56	5,96	20,31	30,28	35,57	50,45	53,32	83,93	84,66

Таблица П.Г.12 – Таблица углов переключения силовых ключей, рассчитанная для усовершенствованной СУ АВ по методу ШИМ с ПВГ с 9 переключениями за 1/4 периода

$m$	$a_1, ^\circ$	$a_2, ^\circ$	$a_3, ^\circ$	$a_4, ^\circ$	$a_5, ^\circ$	$a_6, ^\circ$	$a_7, ^\circ$	$a_8, ^\circ$	$a_9, ^\circ$
1,049	2,47	6,14	20,58	32,22	36,34	50,45	53,95	88,03	89,64
1,050	2,46	6,16	20,59	32,21	36,35	50,47	53,93	88,05	89,63
1,060	2,50	6,37	20,64	32,25	36,47	50,56	53,71	88,16	89,50
1,070	2,63	6,57	20,64	32,40	36,58	50,63	53,47	88,20	89,37
1,080	2,83	6,80	20,62	32,62	36,72	50,69	53,22	88,19	89,22
1,090	3,04	7,05	20,60	32,86	36,89	50,77	52,96	88,17	89,07
1,100	3,25	7,31	20,61	33,09	37,07	50,85	52,72	88,17	88,91
1,101	3,27	7,33	20,61	33,11	37,09	50,86	52,70	88,17	88,90

## ПРИЛОЖЕНИЕ Д



## АКТ

об использовании результатов диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**Гилемова Ильдара Галиевича**

научный руководитель – заведующий кафедрой автоматизированного  
электропривода и мехатроники ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный  
технический университет им. Г.И. Носова» канд. техн. наук, доцент  
Николаев А.А.

Настоящим документом подтверждается использование результатов научных исследований Гилемова И.Г., проведенных в период с августа 2022 г. по апрель 2023 г. на ЗАО «ММК Metalurji» (г. Дёртйол, Турция) в рамках договора о сотрудничестве между предприятием и ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова».

За указанный период времени Гилемовым И.Г. был разработан и исследован **способ улучшения качества напряжения внутризаводской системы электроснабжения за счёт использования усовершенствованной системы управления активных выпрямителей преобразователей частоты главных электроприводов стана горячей прокатки с динамическими таблицами углов переключения силовых ключей, а также методика расчета параметров оптимальных таблиц углов переключения для усовершенствованной системы управления.**

Главные электроприводы стана горячей прокатки 1750 ЗАО «ММК Metalurji» реализованы на базе преобразователей частоты с активными выпрямителями (ПЧ-АВ) серии ACS6000 фирмы АВВ. Результаты проведенных экспериментальных исследований показали, что при работе ПЧ-АВ создают высокий уровень электромагнитных помех в распределительной сети предприятия, что приводило к аварийной работе чувствительных электроприёмников при объединении секций шин 34,5 кВ ЗРУ-34,5 кВ заводской ГПП. Применяемый в активных выпрямителях данных преобразователей алгоритм ШИМ с удалением выделенных гармоник был настроен на исключение из гармонического спектра гармоник с номерами 11, 13, 23, 25. При этом возникает негативный эффект усиления последующих гармоник тока с номерами 35, 37, 47, 49, 59, 61, 71, 73, попадающих в резонансную область частотной характеристики сети 34,5 кВ. В результате чего коэффициент суммарных гармонических составляющих напряжения  $K_U$  на шинах РУ-34,5 кВ главной понизительной подстанции достигает значения 12,5 % при расчете до 150-ой гармоники, что является причиной аварийного отключения чувствительных электроприемников, получающих питание от общих секций заводской ГПП.




Предлагаемая усовершенствованная система управления активного выпрямителя позволяет использовать оптимальные таблицы углов переключения для каждого статического и динамического режима работы электропривода. Расчёт таблиц осуществлялся в соответствии с разработанной методикой по алгоритму ШИМ с подавлением выделенных гармоник. Применение усовершенствованной системы управления активных выпрямителей в составе электроприводов клеток стана горячей прокатки 1750 позволяет получить более значимый технический эффект, чем использование традиционной системы управления АВ ШИМ с удалением выделенных гармоник. Основным критерием выбора оптимальной таблицы была минимизация величины коэффициента  $K_U$  при подавлении гармоник, попадающих в резонансную область. При работе электропривода со сниженной нагрузкой или на холостом ходу усовершенствованная система управления активного выпрямителя переходит на таблицы углов переключения силовых ключей с увеличенной частотой коммутации. Благодаря этому удаётся обеспечить подавление большего числа гармоник. Для обеспечения безаварийной работы преобразователей разработанная методика расчёта таблиц учитывает ограничения по нагреву полупроводниковых ключей. Предварительная проверка работы усовершенствованной системы управления активных выпрямителей с рассчитанными динамическими таблицами углов переключения осуществлялась на разработанной имитационной модели.

Технический эффект от внедрения результатов диссертационной работы заключается в **уменьшении средней величины суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения в точке общего подключения электроприёмников предприятия на 59,7 % до значения  $K_U = 5,2\%$** , что обеспечит устойчивую работу параллельную работу главных электроприводов стана горячей прокатки 1750 и чувствительных электроприёмников, получающих питание от общих секций 34,5 кВ заводской ГПП.

Внедрение результатов диссертационной работы планируется в рамках НИОКР «Разработка и внедрение технических мероприятий по улучшению электромагнитной совместимости главных электроприводов стана горячей прокатки 1750 ЗАО «ММК Metalurji» с питающей сетью 34,5 кВ», запланированной к проведению в 2023 г.

Согласовано:


Начальник службы сервисного обслуживания электрического и электронного оборудования горячего комплекса

  
/ Угюр Чейлан /

Начальник цеха горячей прокатки

  
/ Алпер Акюн /

Ведущий специалист по электрооборудованию

  
/ А.А. Бунин /

## ПРИЛОЖЕНИЕ Е



### АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов научно-исследовательской опытно-конструкторской работы «Исследование электрической сети 10 кВ внутриводского электроснабжения ЧерМК ПАО «Северсталь». Разработка мероприятий, направленных на обеспечение электромагнитной совместимости преобразователей частоты электроприводов четырехклетьевого стана с питающей сетью 10 кВ ГПП-2 ПАО «Северсталь» (Договор №9000112665 от 19.10.2020 г. (тема 2020-45))

Работа проводится в рамках раздела VI «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика, пункта 4 «Технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии», подпункта 8 «Разработка систем рационального использования энергоресурсов и комплексного использования вторичных энергоресурсов» «Перечня научных исследований и опытно-конструкторских разработок, расходы налогоплательщика на которые в соответствии с п. 7 ст. 262 ч.2 НК РФ включаются в состав прочих расходов в размере фактических затрат с коэффициентом 1,5», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.12.2008 №988 (в редакции Постановления Правительства РФ от 6 февраля 2012 г. №96)

### Краткое описание выполненной работы

1. В результате проведенной НИОКР были определены причины ухудшения качества напряжения в распределительной сети 10 кВ района ГПП-2 ЧерМК ПАО «Северсталь», приводящие к нарушению режимов работы чувствительных электроприемников, получающих питание от цеховых РП и других подстанций, имеющих связь с секциями РУ-10 кВ ГПП-2. Основными причинами являются: 1) наличие сложных резонансных явлений в распределительной сети 10 кВ района ГПП-2, обусловленных взаимным влиянием индуктивностей сетевых трансформаторов 110/10 кВ, индуктивностей токоограничивающих реакторов в ячейках РУ-10 кВ ГПП-2, а также емкостей протяженных кабельных линий 10 кВ; 2) неоптимальные настройки ШИМ активных выпрямителей ПЧ ACS6000 главных электроприводов четырехклетьевого стана ППП ХП, при которых в потребляемых токах ПЧ-АВ содержатся значимые гармонические составляющие, совпадающие с областью основного резонанса частотной характеристики сети 10 кВ в точке общего подключения электроприемников.

2. На основании комплексной математической модели сети 10 кВ района ГПП-2 и главных электроприводов четырехклетьевого стана были разработаны

и исследованы различные способы улучшения гармонического состава напряжения на секциях РУ-10 кВ ГПП-2 и РП-19. Из всех рассмотренных технических мероприятий были определены три способа, обеспечивающие наилучший технический эффект по улучшению качества напряжения: 1) организация «чистой» и «грязной» секций в РУ-10 кВ ГПП-2 с переключением всех главных ЭП прокатного стана на «грязную» секцию; 2) установка в РУ-10 кВ РП-155 или в РУ-10 кВ ГПП-2 специализированного УКРМ для коррекции частотной характеристики сети 10 кВ; 3) изменение параметров ШИМ активных выпрямителей ПЧ ACS6000 с целью исключения гармонических составляющих тока, имеющих одинаковую частоту с резонансными областями частотной характеристики сети 10 кВ. Также предложено дополнительное мероприятие по отключению токоограничивающих реакторов в яч. 1 и 21 РУ-10 кВ ГПП-2 для улучшения качества напряжения на секциях РУ-10 кВ РП-19 с целью снижения негативного влияния высших гармоник на работу электрооборудования электроприводов прокатного стана.

3. Выполнено обоснование наиболее приемлемых способов улучшения качества напряжения сети 10 кВ с учетом возможности реализации в условиях действующего производства. Наиболее приоритетным вариантом, не требующим дополнительных капитальных затрат, является коррекция алгоритмов ШИМ активных выпрямителей ПЧ ACS6000. По авторским методикам руководителя и исполнителей НИОКР (Николаев А.А., Буланов М.В., Гилемов И.Г., Афанасьев М.Ю.) были рассчитаны таблицы углов переключения силовых ключей активных выпрямителей ПЧ с учётом исключения гармоник тока, попадающих в резонансные области частотной характеристики сети. Результаты исследований по расчету скорректированных параметров ШИМ АВ, выполненные в рамках данной НИОКР, были переданы специалистам ООО «АББ», которые внесли соответствующие изменения в настройки действующего оборудования ПЧ ACS6000.

### **Технический эффект от внедрения результатов НИОКР**

Согласно протоколу сравнительного анализа замеров гармонических составляющих напряжения за 2020 и 2021 года №205/29 от 20 июля 2021 года после внесения изменений специалистами АБВ в настройки действующего оборудования ПЧ ACS6000. По сравнению с 2020 годом было зафиксировано существенное снижение значения суммарного коэффициента гармонических составляющих междуфазных напряжений  $K_U$  на секциях ГПП-2 и РП-19. При работе

ГПП-2 от одного понизительного трансформатора 110/10 кВ снижение максимального зарегистрированного  $K_U$  составило на секциях ГПП-2 РУ-10 кВ – в 3,5 раза↓ (с 13,98% до 3,97%), РП-19 РУ-10 кВ секция №1 – в 2,2 раза↓ (с 12,99% до 5,93%), РП-19 РУ-10 кВ секция №2 – в 2,6 раза↓ (с 13,65% до 5,35%). Число гармоник, не соответствующих ГОСТ 32141-2013, на секциях ГПП-2 уменьшилось с 12 до 7.

**Даты фактического внедрения результатов НИОКР:** 15.03.2021 г.

**Срок полезного использования:** 5 лет.

Научный руководитель НИОКР:

Заведующий кафедрой автоматизированного электропривода и мехатроники  
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»,  
канд. техн. наук, доцент

 / А.А. Николаев /

Согласовано:

Главный Электрик ХП

 / Э.В. Белов /

Менеджер по электрическому хозяйству

 / А.Ю. Шахов /